Raport Badawczy

Research Report

RB/13/2010

Komputerowo wspomagane zarządzanie miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym

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 2010

KOMPUTEROWO WSPOMAGANE ZARZĄDZANIE MIEJSKIM PRZEDSIĘBIORSTWEM WODOCIĄGOWYM

JAN STUDZIŃSKI

WARSZAWA 2010

Streszczenie

Coraz powszechniej stosuje się w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych systemy SCADA, używane do monitoringu i sterowania kluczowymi obiektami przedsiębiorstwa, takimi jak stacje ujęcia i uzdatniania wody, sieci wodociągowe i kanalizacyjne oraz oczyszczalnie ścieków. Zauważalną wadą stosowania tych systemów jest ich traktowanie jako niezależnych programów, bez integracji z innymi programami stosowanymi również w przedsiębiorstwach wodociągowych, takimi jak systemy informacji przestrzennej GIS czy modele matematyczne eksploatowanych obiektów. Powoduje to znaczne zubożenie możliwości oferowanych przez systemy monitoringu oraz marnowanie się ogromnej liczby archiwizowanych i niewykorzystywanych danych pomiarowych.

W pracy przedstawiono stan obecny informatyzacji krajowych przedsiębiorstw wodociągowych w zakresie systemów monitoringu i pokazano możliwości ich lepszego wykorzystania na przykładzie działań prowadzonych w miejskim przedsiębiorstwie wodociągowo-kanalizacyjnym w Rzeszowie.

W pracy przedstawiono również koncepcję komputerowego wspomagania zarządzania obiektami miejskiego przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjnego, to znaczy siecią wodociągową, siecią kanalizacyjną i oczyszczalnią ścieków. Omówiono strukturę i funkcje tworzonego w tym celu systemu informatycznego, jego moduły i opracowane programy komputerowe oraz trudności związane z ich wdrażaniem. Przedstawiono propozycję kompleksowych badań, mających na celu stworzenie narzędzia wspomagającego procesy decyzyjne w przedsiębiorstwie wodociągowym.

Spis treści

1. Wstęp

Zarządzanie miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym jest złożonym procesem decyzyjnym, który, dla prawidłowej realizacji, wymaga wspomagania komputerowego. Podejmowane decyzje mają charakter strategiczny, długofalowy, charakter taktyczny, związany z planowaniem działań z krótkim horyzontem czasowym, rzędu kilku dni lub najwyżej kilku miesięcy, oraz charakter operacyjny, związany z bieżącą eksploatacją systemu wodociągowo-kanalizacyjnego. Poprawne zarządzanie opiera się na posiadanej wiedzy i doświadczeniu, które z kolei są wynikiem przetwarzania informacji uzyskanych na podstawie pozyskiwanych danych. Do takich danych, generujących odpowiednie informacje i pozwalających zdobywać niezbędną do zarządzania wiedzę, należą między innymi dane pomiarowe pozyskiwane z automatycznych systemów monitoringu. Takie systemy, należące do grupy systemów SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), są od kilkunastu co najmniej lat instalowane w przedsiębiorstwach wodociągowych, na wszystkich jego obiektach, to znaczy na sieciach wodociągowych, sieciach kanalizacyjnych i w oczyszczalniach ścieków. Dostarczają one ogromnej liczby danych, które są rejestrowane i archiwizowane i wykorzystywane do bieżącej kontroli i sterowania obiektami przedsiębiorstwa wodociągowego. Problem polega na tym, że mimo tego, iż zgromadzone dane są przechowywane, to po bieżącym wykorzystaniu przestają być obiektem dalszego zainteresowania. Oznacza to, że użyteczna wiedza ukryta w tych danych nie zostaje z nich w ogóle wydobyta i w konsekwencji ulega zmarnowaniu. W dalszym ciągu zostanie powiedziane, dlaczego tak się dzieje i co można i należy zrobić, aby tę niekorzystną sytuacją zmienić.

Zarządzanie miejskim przedsiębiorstwem wodociągowo-kanalizacyjnym jest złożonym procesem organizacyjnym, technicznym i technologicznym, którego usprawnienie wymaga wspomagania komputerowego. Powszechną praktyką w przedsiębiorstwach wodociągowych jest rozdzielanie procesu zarządzania na dwa rodzaje: administracyjne i techniczne. Pierwszy rodzaj zarządzania dotyczy zagadnień organizacji pracy, gospodarki finansowej, planowania rozwoju, zarządzania kapitałem ludzkim itp. i polega przede wszystkim na przepływie i stosunkowo prostym pod względem obliczeniowym przetwarzaniu informacji. Zarządzanie drugiego rodzaju dotyczy problemów związanych ze sterowaniem i optymalizacją obiektów przedsiębiorstwa i prowadzeniem eksploatowanych w nich procesów technicznych i technologicznych i wymaga ono stosowania na ogół skomplikowanych algorytmów obliczeniowych. Druga charakterystyczna cecha zarządzanie przedsiębiorstwem wodociągowym, to traktowanie typowych jego obiektów, czyli sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków, w sposób niezależny, jako autonomicznych systemów.

Przedstawiona sytuacja jest niewłaściwa, ponieważ lepsze efekty zarządzania uzyska się, jeżeli wszystkie obiekty przedsiębiorstwa potraktuje się jako jeden sprzężony ze sobą system oraz gdy oba rodzaje zarządzania potraktuje się łącznie, jako jeden złożony i wewnętrznie sprzężony proces. Aby zrealizować taką koncepcję zarządzania, należy rozwijać i wdrażać w przedsiębiorstwach wodociągowych *zintegrowane systemy informatyczne kompleksowego zarządzania*, obejmujące swym działaniem zarówno wszystkie obiekty, jak i wszystkie obszary funkcjonowania przedsiębiorstwa, czyli zarówno działania administracyjne, jak i techniczno-technologiczne.

Przeszkodą w praktycznej realizacji prezentowanej koncepcji jest brak obecnie takich systemów na rynku, co oznacza, że należy je dopiero tworzyć a jest to możliwe jedynie w ramach ścisłej współpracy między placówkami badawczymi, przedsiębiorstwami wodociągowymi i również wyspecjalizowanymi firmami informatycznymi. Przyczyną braku takich systemów jest przede wszystkim tradycja i przyzwyczajenie, uwarunkowane niezależnym i zróżnicowanym w czasie rozwojem różnych obiektów przedsiębiorstwa wodociągowego: sieci wodociągowych, sieci kanalizacyjnych i oczyszczalni ścieków, oraz zróżnicowanym historycznie rozwojem związanych z kompleksowym zarządzaniem dyscyplin naukowych: automatyki, informatyki i teorii zarządzania. Jednak ta sytuacja powinna jak najszybciej ulec zmianie, co najmniej z dwóch powodów: zarządzanie administracyjne i techniczno-technologiczne uzupełniają się i wzajemnie warunkują; kompleksowe traktowanie zarządzania przedsiębiorstwem umożliwia jego usprawnienie i uproszczenie.

Brak kompleksowego podejścia do problematyki zarządzania skutkuje tym, że zamiast rozwijania zintegrowanych systemów informatycznych, przedsiębiorstwa wodociągowe zakupują i użytkują wiele samodzielnych programów komputerowych do niezależnego wykonywania różnych zadań związanych z eksploatacją. Powoduje to w konsekwencji problemy w administrowaniu licznymi programami, niemożność pełnego wykorzystania wszystkich informacji i danych pomiarowych gromadzonych w przedsiębiorstwie [7] oraz brak efektywnej współpracy między jego różnymi działami.

W Instytucie Badań Systemowych PAN opracowano koncepcję systemu informatycznego do kompleksowego zarządzania miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym. System uwzględnia wspomaganie działań związanych z zarządzaniem wszystkimi obiektami przedsiębiorstwa i realizację zadań o charakterze administracyjnym i techniczno-technologicznym. Składa się z trzech podsystemów odpowiedzialnych za trzy kluczowe obiekty przedsiębiorstwa wodociągowego a każdy podsystem ma budowę modułową, przy czym podstawowe moduły, to system monitoringu, model matematyczny obiektu i algorytmy optymalizacji. Część opracowanych programów została wdrożona w przedsiębiorstwie wodociągowym w Rzeszowie [12], część z nich jest w trakcie realizacji i testowania a część programów jest dopiero na etapie projektowania. Opracowane programy składające się na system są rezultatem współpracy Instytutu ze specjalistami z Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, z Politechniki Wrocławskiej, Politechniki Warszawskiej i Politechniki Świętokrzyskiej, a także z firmami Intergraph z Warszawy i Infoprod z Poznania. W dalszym ciągu zostaną omówione podsystemy systemu informatycznego i wchodzące w ich skład, już zrealizowane lub realizowane, programy komputerowe.

2. Zarządzanie przedsiębiorstwem wodociągowym

Zarządzanie przedsiębiorstwem wodociągowym, to złożony proces organizacyjny i techniczny, wymagający wspomagania komputerowego, który go usprawnia i uefektywnia. Powszechną praktyką w przedsiębiorstwach, nie tylko wodociągowych, jest, że zarządzanie dzieli się na dwa, praktycznie niezależne rodzaje: zarządzanie organizacyjne i zarządzanie techniczne. To pierwsze, które można nazwać zarządzaniem miękkim (*soft management*), dotyczy zagadnień organizacji pracy, gospodarki finansowej, planowania rozwoju, zarządzania kapitałem ludzkim itp. i polega przede wszystkim na przepływie i przetwarzaniu ilościowym i jakościowym informacji, bez angażowania do tego celu złożonych algorytmów obliczeniowych. Jednocześnie jest to zarządzanie o charakterze strategicznym i taktycznym.

Zarządzanie drugiego rodzaju, które można nazwać zarządzaniem twardym (*hard management*), dotyczy problemów związanych ze sterowaniem i optymalizacją obiektów przedsiębiorstwa i prowadzeniem eksploatowanych w nich procesów technologicznych. Jest to zarządzanie o charakterze przede wszystkim operacyjnym, wymagające jednocześnie stosowania na ogół skomplikowanych algorytmów obliczeniowych.

Przedstawiona sytuacja już w założeniu jest niewłaściwa, ponieważ lepsze efekty otrzyma się, gdy oba rodzaje zarządzania potraktuje się łącznie, jako jeden złożony i wewnętrznie sprzężony proces. Aby jednak taką koncepcję zrealizować, należy rozwijać i wdrażać w przedsiębiorstwach, w tym w szczególności w przedsiębiorstwach wodociągowych, *zintegrowane systemy informatyczne kompleksowego zarządzania*. Zarządzanie kompleksowe oznacza w tym przypadku, że obejmuje ono wszystkie obszary działania przedsiębiorstwa, czyli zarówno działania organizacyjne, jak i techniczne. System informatyczny oznacza, że zarządzanie jest wspomagane komputerowo, przy użyciu programów wchodzących w skład systemu. Z kolei system zintegrowany oznacza, że składowe programy systemu współpracują ze sobą przy realizacji zadań zarządzania, czyli że nie jest to po prostu biblioteka niezależnych programów.

Problemem w realizacji wymienionej koncepcji jest fakt, że takich systemów obecnie nie ma na rynku i należy je dopiero rozwijać. Przyczyną tego stanu jest przede wszystkim przyjęcie wspomnianego założenia o rozdzielności zarządzania organizacyjnego i technicznego, co skutkuje tym, że różnymi rodzajami zarządzania zajmują się specjaliści i eksperci z różnych obszarów nauki: w pierwszym przypadku są to przedstawiciele nauk społecznych, nastawieni na sposób myślenia i wnioskowania jakościowy i spekulacyjny, w drugim przypadku są to przedstawiciele nauk technicznych, nastawieni na sposób myślenia i wnioskowania ilościowy i zmatematyzowany. To rozdzielenie rodzajów zarządzania i wynikające z tego zróżnicowanie dyscyplinarne zajmujących się tymi zagadnieniami specjalistów rodzi oczywiście szereg problemów komunikacyjnych i psychologicznych, co powoduje, że na razie nie widać tendencji do integracji obu środowisk, tak w przypadku programów komputerowych, jak i ich użytkowników.

Jednak taka tendencja powinna się pojawić jak najszybciej i należy ją forsować, co najmniej z trzech powodów: zarządzanie organizacyjne i techniczne uzupełniają się i wzajemnie warunkują; kompleksowe traktowanie zarządzania przedsiębiorstwem umożliwia jego usprawnienie i uproszczenie; zastosowanie metod ilościowych, przejętych z zarządzania technicznego, w zarządzaniu organizacyjnym, pozwala to zarządzanie ujednoznacznić oraz znacznie przyspieszyć i zoptymalizować wchodzące w jego skład procesy, na przykład planowania inwestycyjnego. Brak kompleksowego podejścia do problematyki zarządzania powoduje, że zamiast rozwijania zintegrowanych systemów informatycznych, przedsiębiorstwa, w tym wodociągowe, zakupują i eksploatują wiele samodzielnych programów komputerowych do wykonywania poszczególnych, cząstkowych zadań. Prowadzi to w skrajnym przypadku nawet do pewnego chaosu informatycznego, gdy administrowanie wieloma programami zaczyna być kłopotliwe i czasochłonne. Natomiast w każdym przypadku powoduje to niemożność pełnego wykorzystania wszystkich informacji i danych pomiarowych gromadzonych w przedsiębiorstwie, w bazach danych różnych programów. W szczególności dotyczy to niewykorzystania potencjału wiedzy tkwiącego w ogromnych zbiorach danych generowanych przez systemy monitoringu.

3. Systemy monitoringu w przedsiębiorstwie wodociągowym

Miejskie przedsiębiorstwo wodociągowe zajmuje się zwykle eksploatacją czterech obiektów, traktowanych na ogół w sposób autonomiczny. Są to: stacje poboru i uzdatniania wody, sieć wodociągowa, sieć kanalizacyjna i oczyszczalnia ścieków. W każdym z tych obiektów instaluje się systemy monitoringu, przeznaczone przede wszystkim do bieżącej kontroli prowadzonych w nich procesów technicznych i technologicznych, oraz do sterowania tymi procesami za pomocą lokalnych układów regulacji automatycznej. We wszystkich wymienionych obiektach znajdują się liczne zestawy pompowe, a w przypadku oczyszczalni ścieków, dodatkowo zestawy dmuchaw napowietrzających ścieki w komorach z osadem czynnym, i praca układów regulacji automatycznej polega na stabilizacji pracy nadzorowanych procesów poprzez utrzymanie na zadanym poziomie wartości określonych parametrów procesowych. Te parametry, to przede wszystkim ciśnienia wody i ścieków w przepompowniach zainstalowanych na sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni, oraz poziom tlenu rozpuszczonego w komorach napowietrzania oczyszczalni ścieków.

Oznacza to, że nie steruje się procesami w sposób aktywny, dopuszczający automatyczną zmianę wartości nastaw parametrów w regulatorach układów regulacji, natomiast prowadzi się stabilizację tych procesów przy zadanych stałych wartościach nastaw, co można traktować jako sterowanie pasywne. Taki rodzaj sterowania jest prawidłowy w przypadkach, gdy prowadzone procesy są już w założeniu stabilne, to znaczy nie występują duże i nieoczekiwane zmiany warunków zewnętrznych, wymagające zmiany wartości parametrów procesowych, czyli zmiany nastaw w regulatorach układów regulacji. Ta sytuacja nie dotyczy jednak na ogół procesów realizowanych w przedsiębiorstwach wodociągowych. Bardzo często zmieniają się bowiem warunki pracy obiektów wodociągowych. Na przykład, zmiany poboru wody wpływają na zmianę obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej, ulewne deszcze wpływają na zmianę obciążenia hydraulicznego sieci kanalizacyjnej, a oba te czynniki zmieniają obciążenie hydrauliczne i stan pracy oczyszczalni ścieków.

Już na podstawie powyższych uwag widać, że z jednej strony powinno się w przedsiębiorstwach wodociągowych wprowadzać i stosować algorytmy sterowania aktywnego, z drugiej strony wszystkie obiekty wodociągowe powinno się traktować jako jeden zintegrowany system. Sterowanie aktywne, to sterowanie hierarchiczne i predykcyjne. Hierarchiczność sterowania polega na tym, że przebiega ono co najmniej na dwóch poziomach: na pierwszym, wyższym poziomie działa algorytm zmieniający nastawy regulatorów, na drugim, niższym poziomie przejmują prace układy regulacji automatycznej stabilizujące proces na poziomie zadanych nastaw. Predykcja sterowania polega na tym, że nastawy regulatorów są zmieniane w zależności od przewidywanych zmian warunków zewnętrznych procesu, czyli na przykład od przewidywanych zmian ilości dopływających ścieków surowych i zawartego w nich ładunku zanieczyszczeń do oczyszczalni. Z kolei traktowanie obiektów wodociągowych jako jednego systemu pozwala wzajemnie uzależnić ich eksploatację, to znaczy praca sieci wodociągowej wpływa na funkcjonowanie sieci kanalizacyjnej a to z kolei decyduje o działaniu oczyszczalni ścieków.

Takie podejście niejako inspiruje do tworzenia systemów informatycznych obejmujących swoim działaniem wszystkie obiekty przedsiębiorstwa wodociągowego. Takich systemów, jak już wspomniano, obecnie nie ma. W koncepcji takiego systemu dominującą rolę odgrywają cztery moduły: system GIS generujący mapę numeryczną obiektów przedsiębiorstwa wodociągowego, przede wszystkim sieci wodociągowej i sieci kanalizacyjnej, system monitoringu w sposób jednolity nadzorujący pracę wszystkich

obiektów, modele matematyczne każdego obiektu przedsiębiorstwa i algorytmy optymalizacji, służące tak do optymalizacji, jak i sterowania odnośnymi procesami.

W takim systemie informatycznym szczególna rola przypada systemom monitoringu. Gromadzone przez nie i odpowiednio przetworzone dane pomiarowe umożliwiają tworzenie modeli matematycznych obiektów i realizowanych procesów a także opracowywanie odpowiednich algorytmów sterowania. Aby systemy monitoringu mogły realizować te zadania, muszą być odpowiednio zaprojektowane i obejmować swoim działaniem rzeczywiście cały obszar funkcjonowania przedsiębiorstwa wodociągowego. To wymaga z kolei tak zwanego podejścia systemowego do rozwiązania tego problemu, umożliwiającego stworzenie systemu monitoringu pomyślanego od początku jako integralny element złożonego systemu informatycznego. Wymaga to oczywiście odpowiedniego przygotowania organizacyjnego ze strony przedsiębiorstwa i jest przedsięwzięciem dosyć kosztownym. Dlatego nie ma obecnie takich kompleksowo zaprojektowanych systemów monitoringu w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych a te systemy, które funkcjonują, nie umożliwiają realizacji wymienionych zadań usprawniających zarządzanie przedsiębiorstwem.

Można wyróżnić dwie podstawowe wady instalacji i eksploatacji takich systemów. Po pierwsze, systemy monitoringu, co już wspomniano, są instalowane niezależnie w każdym z kluczowych obiektów przedsiębiorstwa wodociągowego i nie tworzą jednolitego systemu obejmującego całe przedsiębiorstwo. W rezultacie dochodzi do sytuacji, gdy każdy obiekt ma system innego rodzaju, z różnymi programami rejestracji, wizualizacji i archiwizacji danych pomiarowych i z różnymi systemami transmisji danych z punktów pomiarowych, opartymi na telefonii komórkowej, transmisji radiowej czy telemetrii. Oznacza to na ogół niekompatybilność systemów monitoringu i również niemożność wymiany danych między nimi i brak wzajemnej komunikacji. Utrudnia to również administrowanie systemami i podraża ich eksploatację. Po drugie, tworzenie systemów monitoringu jako lokalnych programów, a nie elementów jednolitego systemu informatycznego, powoduje, że punkty pomiarowe monitoringu lokalizowane są na ogół w miejscach niewłaściwych z punktu widzenia zarządzania przedsiębiorstwem. Są to zwykle pompownie i przepompownie wody i ścieków oraz wspomniane już stacje dmuchaw napowietrzających ścieki w komorach oczyszczalni. Dane zbierane z takich punktów pomiarowych umożliwiają wykonywanie standardowych zadań związanych z kontrolą pracy obiektów przedsiębiorstwa i zainstalowanych w nich układów regulacji automatycznej, natomiast nie pozwalają na opracowywanie modeli matematycznych i algorytmów sterowania, niezbędnych do usprawnienia zarządzania tymi obiektami. To powoduje również, że rejestrowane i archiwizowane dane pomiarowe z systemów monitoringu są jedynie gromadzone i po bieżącym ich wykorzystaniu do celów przede wszystkim kontrolnych, nie znajdują już dalszego zastosowania. Jednocześnie należy podkreślić, że takie lokalne instalowanie systemów monitoringu jest znacznie tańsze, niż tworzenie złożonego jednolitego systemu dla całego przedsiębiorstwa, z większą niż obecnie liczbą punktów pomiarowych.

Rekapitulując uwagi przedstawione w tym punkcie, można stwierdzić, co następuje:

- Systemy monitoringu, instalowane obecnie w przedsiębiorstwach wodociągowych jako systemy lokalne, powinny być projektowane jako systemy obejmujące całe przedsiębiorstwo wodociągowe.
- Systemy monitoringu instalowane w przedsiębiorstwie powinny być oparte na jednym programie i jednym systemie transmisji danych, co znacznie redukuje ich koszty inwestycyjne i eksploatacyjne i również ułatwia ich późniejszą eksploatację.

- Punkty pomiarowe dla systemów monitoringu powinny być ustalane w ten sposób, aby zebrane z nich dane pomiarowe umożliwiały nie tylko bieżący nadzór i kontrolę monitorowanych obiektów, ale aby również umożliwiały opracowanie niezbędnych modeli matematycznych i algorytmów sterowania i zarządzania obiektami.
- Dane pomiarowe zbierane z systemów monitoringu powinny być nie tylko przechowywane, jak się dzieje to dotychczas, ale również wykorzystywane do zdobywania na ich podstawie odpowiedniej wiedzy o przedsiębiorstwie, jego obiektach i realizowanych w nich procesach, przy zastosowaniu odpowiednich metod eksploracji danych (*data mining*).

4. Zadania zarządzania uwarunkowane danymi z systemów monitoringu

Można wymienić cały szereg zadań związanych z zarządzaniem przedsiębiorstwem wodociągowym, które są możliwe do realizacji dzięki zainstalowanemu w przedsiębiorstwie systemowi monitoringu, traktowanemu jako integralny element złożonego systemu informatycznego. Należy tu podkreślić, że nie jest właściwe projektowanie i wdrażanie jedynie wybranych modułów systemu informatycznego, natomiast w celu uzyskania spodziewanych efektów powinno się planować od razu system złożony i zintegrowany, uwzględniający ścisłą współpracę wszystkich jego podstawowych modułów, to znaczy systemu GIS mapy numerycznej, systemu monitoringu, modeli matematycznych obiektów i algorytmów optymalizacji. Jest to uzasadnione tak względami merytorycznymi, jak również ekonomicznymi i organizacyjnymi. Inne cząstkowe podejścia do wykonania systemu informatycznego wydłużają proces uzyskania końcowego produktu, podrażają go i uniemożliwiają uzyskiwanie wszystkich założonych celów związanych z zarządzaniem przedsiębiorstwem.

Jednak należy pamiętać, że klasyczne przedsiębiorstwo wodociągowe, to połączone ze sobą szeregowo trzy kluczowe obiekty: sieć wodociągowa ze stacjami poboru i uzdatniania wody, sieć kanalizacyjna i oczyszczalnia ścieków, które wprawdzie są ze sobą sprzęgnięte poprzez sygnały wejściowe i wyjściowe, to jednocześnie, z braku sprzężenia zwrotnego między nimi, funkcjonują one w dużym stopniu w sposób autonomiczny i również w ten sposób są one obecnie zarządzane. Dlatego projektując zintegrowany system informatyczny zarządzania całym przedsiębiorstwem wodociągowym, wydaje się celowym planowanie go jako hybrydy złożonej z trzech podsystemów odpowiedzialnych za każdy z kluczowych obiektów. Jednocześnie każdy z tych trzech podsystemów miałby podobną budowę modułową, złożoną z czterech standardowych modułów, to znaczy z systemów GIS i SCADA oraz z modułu modeli matematycznych i z modułu programów optymalizacji. Dzięki tym algorytmom obliczeniowym, każdy z podsystemów mógłby realizować 'twarde' i 'miękkie' zadania zarządzania odnośnymi obiektami i w rezultacie całym przedsiębiorstwem wodociągowym.

Podstawowe zadania związane z kompleksowym zarządzaniem przedsiębiorstwem wodociągowym, realizowane przez zintegrowany system informatyczny, są w ogólności następujące:

- Komputerowa wizualizacja sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków lub wybranych elementów tych obiektów.
- Wyznaczanie aktualnego stanu pracy każdego obiektu.

- Optymalizacja i projektowanie sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków.
- Sterowanie operacyjne procesami zaopatrzenia w wodę, odbioru i oczyszczania ścieków.
- Lokalizacja awarii i ukrytych wycieków wody w sieci wodociągowej oraz awarii i ukrytych wycieków ścieków w sieci kanalizacyjnej.
- Planowanie i obsługa planowanych przeglądów eksploatacyjnych sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków.
- Planowanie krótko- i długoterminowych prac rewitalizacyjnych i inwestycyjnych na każdym z obiektów.
- Rejestracja i nadzór wydawanych warunków technicznych dla prac remontowych, modernizacyjnych i rozbudowy każdego z obiektów.
- Rejestracja odbiorów technicznych na sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i w oczyszczalni ścieków.
- Rejestracji awarii występujących na każdym z obiektów.
- Wykonywanie różnorodnych analiz tematycznych i przestrzennych związanych z siecią wodociągową, siecią kanalizacyjną i oczyszczalnią ścieków.

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

- Nadzór i kontrola bieżącego stanu pracy sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków.
- Kalibracja modeli fizykalnych wymienionych obiektów, tworzonych przy użyciu równań bilansowych.
- Okresowa rekalibracja modeli fizykalnych.
- Wyznaczanie modeli parametrycznych sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków, przy użyciu, na przykład, szeregów czasowych, sieci neuronowych i zbiorów rozmytych.
- Lokalizacja awarii na poszczególnych obiektach.
- Lokalizacja ukrytych wycieków wody w sieci wodociągowej i wycieków ścieków w sieci kanalizacyjnej.
- Planowanie lokalizacji punktów pomiarowych dla systemu monitoringu instalowanego na sieci wodociągowej.

Szczególnie istotne jest zadanie związane z planowaniem lokalizacji projektowanego systemu monitoringu. Taki system, aby mógł efektywnie wspomagać pozostałe moduły systemu informatycznego w zarządzaniu przedsiębiorstwem wodociągowym, musi dostarczać możliwie dużo informacji o stanie pracy monitorowanego obiektu przy możliwie małej liczbie punktów pomiarowych, ze względu na duże koszty ich instalacji. Idealny przypadek to taki, gdy w każdym węźle i na każdym odcinku sieci wodociągowej jest zainstalowany punkt

pomiarowy, co praktycznie nie jest możliwe. Z kolei przypadek najczęściej spotykany w praktyce to taki, gdy punkty pomiarowe instaluje się w źródle wody i w przepompowniach strefowych sieci wodociągowej. Dane pomiarowe z takich punktów nie dają jednak informacji o pracy sieci wewnątrz tych stref. To powoduje z kolei, że nie jest możliwa automatyczna kalibracja modeli hydraulicznych sieci, ich rekalibracja, a także lokalizacja awarii i ukrytych wycieków wody. Dlatego można już zauważyć, że realizacja takich zadań, jak kalibracja modeli hydraulicznych, lokalizacja awarii i projektowanie systemu monitoringu są ze sobą ściśle związane i wymagają jednoczesnego zaangażowania kilku modułów systemu informatycznego, czyli systemów GIS i SCADA, modeli matematycznych i również algorytmów optymalizacji.

Aby system monitoringu dla sieci wodociągowej został właściwie zaprojektowany, należy część punktów pomiarowych zlokalizować w tak zwanych punktach wrażliwych sieci, to znaczy w punktach, w których rejestruje się zmiany ciśnienia lub przepływu spowodowane zmianami tych parametrów zaistniałymi nie tylko w bezpośrednim sąsiedztwie danego punktu, ale również w dalszej odległości od niego. Takie punkty znajduje się, korzystając ze skalibrowanego modelu hydraulicznego sieci wodociągowej i z wykonanych przy jego użyciu obliczeń symulacyjnych, kiedy symuluje się pozorowane wycieki kolejno w każdym węźle sieci. Dla tych wycieków wyznacza się tak zwane stopnie wrażliwości wszystkich węzłów sieci i na podstawie sporządzonego wykazu węzłów według ich stopnia wrażliwości wybiera się miejsca lokalizacji punktów pomiarowych w węzłach o największej wrażliwości. Liczba ostatecznie wybranych punktów pomiarowych jest kompromisem między koniecznością efektywnego opomiarowania sieci wodociągowej i ilością dostępnych w przedsiębiorstwie środków finansowych.

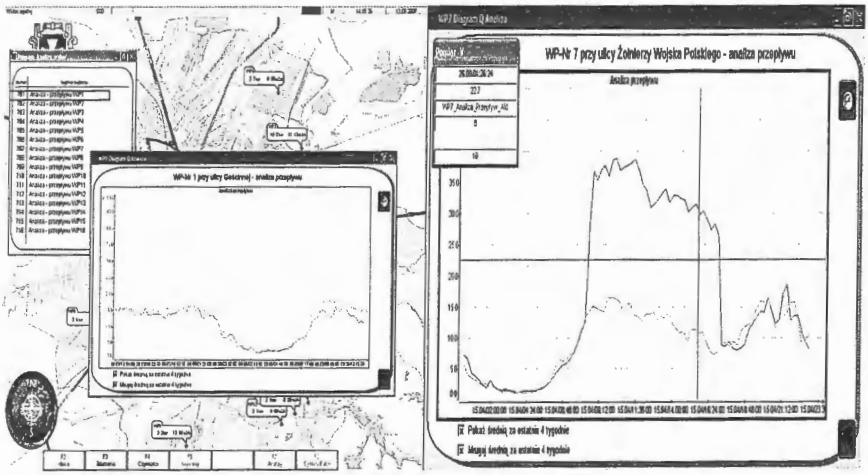
Złożonym problemem jest również kalibracja modelu hydraulicznego sieci wodociągowej (ekran takiego modelu pokazano na rys. 2). Można jej dokonać, korzystając z dobrze zaprojektowanego systemu monitoringu i z algorytmu optymalizacji wielokryterialnej. W takim algorytmie, dla potrzeb kalibracji, definiuje się dwa kryteria celu, określone na uchybach między obliczonym z modelu i zmierzonym ciśnieniem i przepływem, przy czym wartości obliczane są porównywane z danymi pozyskiwanymi z punktów pomiarowych systemu monitoringu. Aby wykonać takie zadanie, należy już jednak dysponować poprawnie zaprojektowanym systemem monitoringu, co zależy z kolei od posiadania dobrze skalibrowanego modelu hydraulicznego. Dlatego zadanie kalibracji można właściwie wykonać jedynie metodą kolejnych przybliżeń, realizując je w kilku krokach: najpierw dokonuje się kalibracji modelu w sposób ręczny, korzystając z pomiarów uzyskanych w wyniku szarży pomiarowej przeprowadzonej na sieci wodociągowej; następnie projektuje się system monitoringu, wyznaczając właściwie usytuowane punkty pomiarowe na podstawie obliczeń symulacyjnych wykonanych za pomocą modelu hydraulicznego; wreszcie, mając wstępnie skalibrowany model i wykonany z jego pomocą system monitoringu, można dokonać rekalibracji modelu, stosując do tego celu algorytm optymalizacji dwukryterialnej. Ostatnie dwa kroki należy powtarzać, rozbudowując system monitoringu i dokonując rekalibracji modelu hydraulicznego po każdym remoncie, modernizacji lub rozbudowie sieci wodociągowej.

Realizacja wymienionych wyżej zadań doprowadza w konsekwencji do utworzenia dwóch podstawowych modułów systemu informatycznego: modelu hydraulicznego i systemu monitoringu. Umożliwiają one realizację zadania związanego z lokalizacja awarii i ukrytych wycieków w sieci wodociągowej. Zasadniczo można to zadanie wykonać w prosty sposób, korzystając jedynie z systemu monitoringu, co zostało zrealizowane na sieci wodociągowej w Rzeszowie. Obecnie eksploatowany tam system ProconWin umożliwia między innymi śledzenie poprawności pracy sieci poprzez porównywanie aktualnych przebiegów

przepływów i ciśnień w punktach pomiarowych z charakterystykami wzorcowymi tych parametrów. Charakterystyki wzorcowe zostały utworzone jako przebiegi uśrednione odpowiednich sygnałów, zarejestrowanych w tych punktach w kilku poprzednich analogicznych dniach tygodnia. Wartości przepływów, wzorcowe i bieżące, zapisane w postaci wykresów, można wykorzystywać się w praktyce eksploatacyjnej sieci w celach analitycznych. Z takich 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 pokazano na rys. 1. Widać na nim dwa przykładowe przebiegi przepływu, jeden prawidłowy (*rysunek lewy*) a drugi nietypowy, dla pojedynczego punktu pomiarowego systemu monitoringu. W tym drugim przypadku, gwałtowny, istotnie różny od wzorcowego wzrost przepływu wody w sieci wodociągowej informuje służby pracownicze przedsiębiorstwa o kilku prawdopodobnych nieprawidłowościach zaistniałych w tym fragmencie sieci, którymi mogą być:

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

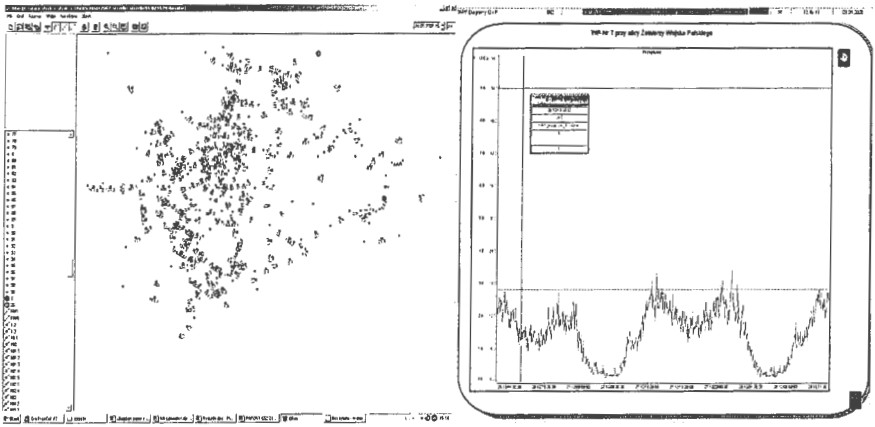


Rys. 1. Diagram trendu i bieżącego prawidłowego przepływu wody (*rysunek lewy*) oraz porównanie anomalii przepływu (*wykres górny na rysunku prawym*) ze średnim trendem (*wykres dolny*) w monitorowanym węźle pomiarowym.

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 hydrantu przeciwpożarowego nie zawsze oznacza pobór wody zgodnie z jej przeznaczeniem (pożar), lecz nierzadko kradzież wody, na przykład na cele budowlane bądź ogrodnicze.

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 jedynie 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 do wykrywania stanów awaryjnych w sieci, 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. 2 (*rysunek prawy*), gdzie istotnym zmianom przepływu w obserwowanym punkcie pomiarowym praktycznie nie towarzyszą żadne zmiany ciśnienia w tym punkcie.



Rys. 2. Ekran modelu hydraulicznego sieci wodociągowej (*rysunek lewy*) oraz obserwowane wartości istotnych zmian przepływu i stałego ciśnienia w wybranym punkcie pomiarowym systemu monitoringu.

Przedstawiony wyżej prosty algorytm lokalizacji awarii, a właściwie sygnalizacji stanów nietypowych pracy sieci wodociągowej, może być realizowany za pomocą jedynie systemu monitoringu, bez konieczności stosowania innych modułów systemu informatycznego.

Korzystając jednak z dodatkowych wybranych modułów systemu, można zaproponować znacznie bardziej wyrafinowany algorytm lokalizacji awarii i ukrytych wycieków wody. Jest on podobny do algorytmu optymalnego doboru punktów pomiarowych dla planowanego systemu monitoringu i składa się z czterech następujących etapów.

Etap pierwszy polega na wyznaczeniu, dla standardowych obciążeń sieci wodociągowej, rozkładów ciśnień i przepływów w sieci za pomocą obliczeń wykonanych modelem hydraulicznym. W rezultacie, dla każdego standardowego obciążenia, otrzymuje się dwie powierzchnie rozkładów.

Kolejny etap, to wykonanie obliczeń hydraulicznych, również dla standardowych obciążeń sieci wodociągowej, z symulowanymi wyciekami awaryjnymi w każdym węźle sieci. W rezultacie otrzymuje się dla pojedynczego standardowego obciążenia sieci liczbę powierzchni rozkładów ciśnień i przepływów równą podwójnej liczbie jej węzłów.

Etap trzeci polega na bieżącym śledzeniu stanu pracy sieci wodociągowej poprzez obserwację pomiarów w punktach monitoringu i porównywanie ich z wartościami charakterystyk wzorcowych wyznaczonych dla tych punktów.

Wreszcie *etap czwarty*, to reakcja w przypadku stwierdzenia anomalii w wartości ciśnienia lub przepływu dla jakiegoś punktu pomiarowego. Uwzględniając wartości ciśnień i przepływów zarejestrowanych w danym momencie we wszystkich punktach pomiarowych systemu monitoringu, porównuje się je z odnośnymi wartościami ciśnień i przepływów na wyznaczonych wcześniej powierzchniach rozkładów dla symulowanych stanów awaryjnych i dla aktualnego, wynikającego z pory i dnia tygodnia, stopnia obciążenia sieci wodociągowej. Znajdując, według określonej normy, powierzchnie najbardziej zbliżone do aktualnych rozkładów ciśnień i przepływów, wskazuje się na potencjalne miejsce awarii, której wcześniejsza symulacja doprowadziła do wyznaczenia tych powierzchni.

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

Algorytm ten wymaga znacznie mniejszej liczby generowanych i zapamiętywanych danych liczbowych, jednocześnie może być mniej dokładny w przypadku dużych miejskich sieci wodociągowych, w których lokalna awaria lub wyciek mogą być praktycznie niezauważalne z punktu widzenia zmiany obciążenia przepompowni strefowej lub pompowni źródłowej.

Powyższe zastosowania systemu monitoringu, pokazane na przykładzie sieci wodociągowej, w prosty sposób mogą być przeniesione również na ciśnieniowe sieci kanalizacyjne, które działają w podobny sposób i są opisywane podobnymi modelami fizykalnymi.

5. System informatyczny zarządzania przedsiębiorstwem wodociągowym

Opracowana w Instytucie Badań Systemowych PAN koncepcja systemu informatycznego do kompleksowego zarządzania miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym uwzględnia wspomaganie działań związanych z zarządzaniem wszystkimi obiektami przedsiębiorstwa i realizację zadań o charakterze administracyjnym i techniczno-technologicznym. System składa się z trzech podsystemów odpowiedzialnych za trzy kluczowe obiekty przedsiębiorstwa wodociągowego a każdy podsystem ma budowę modułową, przy czym podstawowe moduły, to system monitoringu, model matematyczny obiektu i algorytmy optymalizacji.

5.1. System informatyczny komputerowego wspomagania zarządzania miejską siecią wodociągową

Opracowany dla sieci wodociągowej system informatyczny jest najbardziej zaawansowany w rozwoju, ma otwartą budowę modułową i składa się z pięciu podstawowych modułów:

1. Systemu GIS generującego mapę numeryczną sieci wodociągowej (G/Water).
2. Systemu SCADA monitoringu sieci (ProconWin).
3. Systemu billingowego CIS (*Customers Information System*) do rejestracji ilości sprzedanej wody i archiwizacji użytkowników sieci wodociągowej.
4. Modelu hydraulicznego sieci (MOSUW-H, OHIO, EPANET).
5. Programu optymalizacji wielokryterialnej (REH).

Struktura, własności i funkcjonowanie systemu informatycznego są następujące:

- Branżowa Baza Danych (BBD) w systemie GIS gromadzi dane graficzne i numeryczne niezbędne do zarządzania siecią wodociągową.
- Poprzez specjalne pliki buforowe istnieje wzajemna komunikacja między modułami systemu, przy czym BBD jest elementem integrującym wszystkie programy systemu; dzięki temu mechanizmowi komunikacji wszystkie programy mogą ze sobą współpracować.
- Transmisja danych między punktami pomiarowymi i programem wizualizacji systemu monitoringu odbywa się za pomocą telefonii komórkowej lub drogą radiową.
- Pomiary z monitoringu służą do kalibracji i okresowej rekalibracji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej oraz do lokalizacji awarii i wycieków w sieci.
- Model hydrauliczny wyznacza średnie dobowe lub bieżące godzinowe przepływy i ciśnienia w sieci.

- W modelu hydraulicznym można zadawać do obliczeń symulacyjnych rozbiory węzłowe lub odcinkowe, przy czym jest on sprzęgnięty z systemem CIS, skąd pozyskuje dane o okresowych rozbiorach w węzłach użytkowników sieci.
- Obliczenia hydrauliczne są wykonywane na podstawie grafów obliczeniowych sieci generowanych do modelu sieci przez system GIS mapy numerycznej.
- Z modelem hydraulicznym współpracuje program optymalizacji wielokryterialnej, umożliwiający definiowanie kilku kryteriów celu.

Każdy z wymienionych modułów systemu może działać w sposób autonomiczny, wykonując zadania zgodne ze swoim przeznaczeniem, jednak dopiero współpraca tych programów znacznie poszerza zakres ich działania i umożliwia kompleksowe zarządzanie siecią wodociągową, to znaczy:

- Sprzęgnięcie mapy numerycznej z modelem hydraulicznym i programem optymalizacji umożliwia wykonywanie zadań optymalizacji, projektowania i sterowania siecią wodociągową oraz automatyczną kalibrację modelu hydraulicznego.
- Sprzęgnięcie mapy numerycznej z modelem hydraulicznym i systemem monitoringu umożliwia rozwiązywanie zadania lokalizacji awarii i wycieków w sieci wodociągowej.
- Sprzęgnięcie mapy numerycznej z modelem hydraulicznym umożliwia rozwiązywanie zadania optymalnego doboru punktów pomiarowych dla systemu monitoringu (przy lokalizacji punktów pomiarowych należy minimalizować ich liczbę i maksymalizować ilość dostarczanej przez nie informacji).

Dodatkowo w strukturze systemu informatycznego znajduje się program z algorytmami krigingowymi aproksymacji przestrzennej (KRIPOW). Program ten współpracuje z modelem hydraulicznym i z mapą numeryczną sieci wodociągowej. Umożliwia on wykonywanie dodatkowych zadań związanych z zarządzaniem siecią wodociągową, takich jak:

- Wyznaczanie współrzędnych wysokościowych punktów węzłowych sieci wodociągowej (punkty węzłowe sieci są niezbędne do wygenerowania grafu obliczeniowego sieci, umożliwiającego uruchomienie modelu hydraulicznego).
- Wyznaczanie map rozkładów przepływów i ciśnień w sieci wodociągowej (mapy rozkładów przepływów i ciśnień umożliwiają operatorowi sieci szybką jakościową ocenę stanu jej pracy i lokalizację obszarów o niewłaściwych prędkościach lub ciśnieniach wody).

Opracowany system informatyczny realizuje następujące podstawowe funkcje zarządzania eksploatacyjnego siecią wodociągową:

- Komputerowa wizualizacja sieci lub jej wybranych fragmentów.
- Wyznaczanie aktualnego stanu pracy sieci.
- Optymalizacja, projektowanie i sterowanie operacyjne siecią.
- Lokalizacja ukrytych wycieków wody.

Mapa numeryczna umożliwia również wykonywanie analiz tematycznych sieci wodociągowej, takich na przykład, jak:

- Lokalizacja zasuw, które należy zamknąć w przypadku awarii, aby ograniczyć straty wody w miejscu wycieku.

- Wizualizacja pokrycia wybranego obszaru terenu zasięgiem hydrantów zainstalowanych na sieci.

Wymienione funkcje systemu informatycznego dotyczą zarządzania technicznego siecią wodociągową. Druga sfera zarządzania obejmuje zadania o charakterze administracyjnym. Do ich realizacji należy zintegrować wymienione i już opracowane programy systemu z programami o charakterze zarządczym, które są już wykonane i eksploatowane w przedsiębiorstwie wodociągowym względnie należy je dopiero opracować. Są to następujące programy:

- Program obsługi finansowo-księgowej (eksploatowany).
- Program rejestracji i nadzoru wydawanych warunków technicznych.
- Program rejestracji odbiorów technicznych sieci wodociągowej.
- Program rejestracji awarii występujących na sieci (opracowany).
- Program obsługi planowanych przeglądów eksploatacyjnych sieci.

Włączenie tych programów do struktury opracowanego systemu informatycznego zwiększa jego funkcjonalność i integruje pracę różnych działów przedsiębiorstwa wodociągowego. Jednocześnie integracja tych programów w ramach jednolitego systemu pozwoli opracować algorytm i program rewitalizacji sieci wodociągowej, czyli generowania planów inwestycyjnych dla prac remontowych i modernizacyjnych sieci, a także opracować program generowania planów inwestycyjnych dla prac rozwojowych.

W strukturze przedstawionego systemu znajdują się: system GIS G/Water firmy Intergraph; system SCADA ProconWin firmy Infoprod; trzy modele hydrauliczne sieci wodociągowej: model OHIO opracowany na podstawie algorytmów autorskich Andrzeja Pawlaka [3], model MOSUW-H i program optymalizacji REH opracowane na podstawie algorytmów Reinharda Straubela [13], model EPANET dostępny w Internecie; program aproksymacji krigingowej opracowany w IBS PAN [5].

5.2. System informatyczny komputerowego wspomagania zarządzania miejską siecią kanalizacyjną

Opracowany dla sieci kanalizacyjnej system informatyczny jest najmniej zaawansowany z powodu trudności w modelowaniu matematycznym sieci kanalizacyjnej grawitacyjnej. Ma on, podobnie jak system poprzedni, otwartą budowę modułową i składa się obecnie z pięciu podstawowych modułów:

2. Systemu GIS generującego mapę numeryczną sieci wodociągowej (G/Water).
3. Systemu SCADA monitoringu sieci (Wizcon).
4. Modelu obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej (do prognozowania obciążenia sieci kanalizacyjnej).
5. Modelu hydraulicznego sieci (MOSUK-H dla sieci ciśnieniowej; model sieci grawitacyjnej jest w fazie realizacji).
6. Programu optymalizacji wielokryterialnej (REH).

Struktura, własności i funkcjonowanie systemu informatycznego dla sieci kanalizacyjnej są w założeniach podobne do tych opracowanych dla sieci wodociągowej, jednak z braku

działającego modelu hydraulicznego kanalizacyjnej sieci grawitacyjnej mają one obecnie charakter niezrealizowanej koncepcji. W tym sensie są one następujące:

- Branżowa Baza Danych w systemie GIS gromadzi dane niezbędne do zarządzania siecią kanalizacyjną, stanowiąc element integrujący wszystkie programy systemu.
- Poprzez specjalne pliki buforowe istnieje wzajemna komunikacja i współpraca między modułami systemu.
- Transmisja danych między punktami pomiarowymi i programem wizualizacji systemu monitoringu odbywa się drogą radiową.
- Pomiary z monitoringu służą do kalibracji i okresowej rekalibracji modelu hydraulicznego sieci kanalizacyjnej oraz do lokalizacji awarii i wycieków w sieci.
- Model hydrauliczny wyznacza średnie dobowe lub bieżące godzinowe przepływy w sieci i dodatkowo ciśnienia w sieci grawitacyjnej.
- Obliczenia hydrauliczne są wykonywane na podstawie grafów obliczeniowych sieci generowanych do modelu sieci przez system GIS mapy numerycznej.
- Z modelem hydraulicznym współpracuje program optymalizacji wielokryterialnej, umożliwiający definiowanie kilku kryteriów celu.

Opracowany system informatyczny będzie realizował realizuje następujące podstawowe funkcje zarządzania eksploatacyjnego siecią kanalizacyjną:

- Komputerowa wizualizacja sieci lub jej wybranych fragmentów.
- Wyznaczanie aktualnego stanu pracy sieci.
- Optymalizacja, projektowanie i sterowanie operacyjne siecią.
- Lokalizacja awarii i ukrytych wycieków ścieków.

Podobnie jak poprzednio, z programami realizującymi zarządzanie techniczne planuje się zintegrowanie następujących programów o charakterze zarządczym:

- Program obsługi finansowo-księgowej.
- Program rejestracji i nadzoru wydawanych warunków technicznych.
- Program rejestracji odbiorów technicznych sieci kanalizacyjnej.
- Program rejestracji awarii występujących na sieci.
- Program obsługi planowanych przeglądów eksploatacyjnych sieci.

Integracja tych programów w ramach jednolitego systemu pozwoli opracować programy generowania planów inwestycyjnych dla prac remontowych i modernizacyjnych sieci kanalizacyjnej (rewitalizacja) a także dla prac rozwojowych.

Należy przy tym zauważyć, że realizacja systemu komputerowego wspomagania zarządzania dla sieci kanalizacyjnej jest znacznie trudniejsza i również bardziej kosztowna, niż dla sieci wodociągowej. Spowodowane jest to wspomnianymi większymi trudnościami przy tworzeniu modelu hydraulicznego sieci kanalizacyjnej, który powinien zasadniczo integrować dwa różne rodzaje modeli: dla sieci grawitacyjnej i sieci ciśnieniowej; większym skomplikowaniem prac związanych z kalibracją modelu hydraulicznego, której nie można zautomatyzować za pomocą programu optymalizacji wielokryterialnej; a także znacznie większymi kosztami przy wykonywaniu systemu monitoringu, ze względu na większe koszty

urządzeń pomiarowych. To powoduje, że prace związane z informatyzacją sieci kanalizacyjnych są zwykle mniej zaawansowane, niż w przypadku sieci wodociągowych.

W strukturze przedstawionego i nie przetestowanego systemu znajdują się obecnie: system GIS G/Water firmy Intergraph; system SCADA Wizcon; model hydrauliczny sieci kanalizacyjnej ciśnieniowej MOSUK-H i program optymalizacji REH opracowane na podstawie algorytmów Reinharda Straubela; modele obciążenia sieci wodociągowej opracowane w IBS PAN w postaci szeregów czasowych, sieci neuronowych i zbiorów rozmytych. Trwają prace związane z opracowaniem modelu hydraulicznego kanalizacyjnej sieci grawitacyjnej, który pozwoli sprzęgnąć wszystkie moduły i programy systemu i realizować zaplanowane zadania zarządzania.

5.3. System informatyczny komputerowego wspomagania zarządzania miejską oczyszczalnią ścieków

Opracowany dla oczyszczalni ścieków system informatyczny i obecnie koncentruje na zarządzaniu techniczno-technologicznym, czyli usprawnieniu procesu sterowania operacyjnego obiektem. W oczyszczalni znajdują się liczne zestawy pompowe i zestaw dmuchaw napowietrzających ścieki w komorach z osadem czynnym, i sterowanie nimi jest realizowane za pomocą układów regulacji automatycznej. Z kolei działanie tych układów polega na stabilizacji pracy nadzorowanych procesów poprzez utrzymanie na zadanym poziomie wartości określonych parametrów procesowych. Te parametry, to przepływy ścieków w przepompowniach zainstalowanych w oczyszczalni oraz poziom tlenu rozpuszczonego w jej komorach napowietrzania. Oznacza to, że nie steruje się procesami oczyszczania w sposób aktywny, dopuszczający automatyczną zmianę wartości nastaw parametrów w regulatorach układów regulacji, natomiast prowadzi się stabilizację tych procesów przy zadanych stałych wartościach nastaw, co można traktować jako *sterowanie pasywne*. Taki rodzaj sterowania jest prawidłowy w przypadkach, gdy prowadzone procesy są już w założeniu stabilne, to znaczy nie występują duże i nieoczekiwane zmiany procesowych warunków zewnętrznych, wymagające zmiany wartości nastaw w regulatorach układów regulacji. Ta sytuacja nie dotyczy jednak na ogół procesów realizowanych w przedsiębiorstwach wodociągowych. Bardzo często zmieniają się bowiem warunki pracy obiektów wodociągowych. Na przykład, zmiany poboru wody wpływają na zmianę obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej, ulewne deszcze wpływają na zmianę obciążenia hydraulicznego sieci kanalizacyjnej, a oba te czynniki zmieniają obciążenie hydrauliczne i stan pracy oczyszczalni ścieków. Wynika z tego, że w oczyszczalni ścieków powinno się wprowadzać i stosować algorytmy *sterowania aktywnego*. Sterowanie aktywne, to między innymi *sterowanie hierarchiczne i predykcyjne*. Hierarchiczność sterowania polega na tym, że przebiega ono co najmniej na dwóch poziomach: na pierwszym, wyższym poziomie działa algorytm zmieniający nastawy regulatorów, na drugim, niższym poziomie przejmują pracę układy regulacji automatycznej stabilizujące proces na poziomie zadanych nastaw. Predykcja sterowania polega na tym, że nastawy regulatorów są zmieniane w zależności od przewidywanych zmian warunków zewnętrznych procesu, czyli od przewidywanych zmian ilości dopływających ścieków surowych i zawartego w nich ładunku zanieczyszczeń do oczyszczalni.

Taką koncepcję sterowania opracowano w IBS PAN [11] i za pomocą odpowiedniego oprogramowania jest ona realizowana w postaci tworzonego systemu informatycznego. Ma on, podobnie jak poprzednie systemy, otwartą budowę modułową i składa się obecnie z pięciu podstawowych modułów:

6. Systemu SCADA monitoringu.
7. Modelu dopływu ścieków surowych do oczyszczalni (do prognozowania obciążenia hydraulicznego i ładunku zanieczyszczeń dopływającego do obiektu).
8. Modelu fizykalnego oczyszczalni ścieków.
9. Algorytmu sterowania predykcyjnego.
10. Pakietu programów optymalizacji statycznej.

Struktura, własności i funkcjonowanie systemu informatycznego dla oczyszczalni ścieków są następujące:

- System monitoringu gromadzi dane niezbędne do zarządzania oczyszczalnią, stanowiąc element integrujący wszystkie programy systemu.
- Poprzez specjalne pliki buforowe istnieje wzajemna komunikacja i współpraca między modułami systemu.
- Transmisja danych między punktami pomiarowymi i programem wizualizacji systemu monitoringu odbywa za pomocą sieci kablowej.
- Pomiary z monitoringu oraz programy optymalizacji statycznej służą do kalibracji i okresowej rekalibracji modelu fizykalnego oczyszczalni, opracowanego w postaci bilansowych równań różniczkowych zwyczajnych.
- Model fizykalny służy do obliczeń symulacyjnych dla algorytmu sterowania predykcyjnego.
- Wejściem do modelu fizykalnego są prognozy dopływu ścieków generowane przez modele parametryczne dopływu, opracowane w postaci szeregów czasowych, sieci neuronowych i zbiorów rozmytych.

Opracowany system informatyczny będzie realizował realizuje następujące podstawowe funkcje zarządzania eksploatacyjnego siecią kanalizacyjną:

- Komputerowa symulacja procesu technologicznego oczyszczania ścieków.
- Optymalizacja, projektowanie i sterowanie operacyjne oczyszczalnią.

Należy zauważyć, że realizacja systemu komputerowego wspomagania zarządzania oczyszczalnią ścieków jest podobnie trudna i kosztowna, jak dla sieci kanalizacyjnej. Spowodowane jest to przede wszystkim trudnościami przy tworzeniu modelu fizykalnego oczyszczalni, a dokładniej, jego kalibracją, która wymaga wykonania bardzo kosztownych i trudnych pod względem organizacyjnym eksperymentów pomiarowych na obiekcie, dostarczających pomiary uzupełniające dane zebrane z systemu SCADA. To powoduje, że prace związane z proponowana informatyzacją oczyszczalni są w praktyce również mniej zaawansowane, niż w przypadku sieci wodociągowych.

W strukturze przedstawionego i nie przetestowanego systemu znajdują się obecnie: system SCADA; model fizykalny oczyszczalni ścieków opracowany przez Marcina Stachurę [9] na podstawie algorytmów autorskich Ryszarda Szeteli [14]; modele dopływu ścieków surowych do oczyszczalni opracowane przez Lidię Bartkiewicz [4] oraz algorytmy sterowania predykcyjnego oczyszczalnią opracowane przez Marcina Stachurę i Krzysztofa Janiszowskiego [10]. Trwają starania związane z wykonaniem szarzy pomiarowej na rzeczywistej oczyszczalni w celu uzyskania zbioru pomiarów umożliwiających kalibrację modelu fizykalnego, co pozwoli sprzęgnąć wszystkie moduły i programy systemu i realizować zaplanowane zadania zarządzania oczyszczalnią.

6. Przykład schematu organizacyjnego prac B+R dla informatyzacji miejskiego przedsiębiorstwa wodociągowego

Rzadko rozwiązania informatyczne opracowywane w instytutach naukowych mają zdolności aplikacyjne. Podstawowe przyczyny tego są następujące:

- w instytutach nie ma na ogół szczegółowej wiedzy o problemach i uwarunkowaniach technicznych i finansowych istniejących w przedsiębiorstwach wodociągowych;
- w instytutach nie ma umiejętności i możliwości tworzenia profesjonalnych programów komputerowych a powstające tam programy mają zwykle charakter autorski.

Możliwości tworzenia profesjonalnych programów mają natomiast profesjonalne firmy informatyczne, jednak:

- takie firmy są nastawione przede wszystkim na szybki zbyt swoich gotowych produktów (*commercial off-the-shelf*);
- firmy te nie mają chęci, środków i czasu na opracowywanie zaawansowanych algorytmów obliczeniowych, rozwiązujących problemy eksploatacyjne generowane w przedsiębiorstwie wodociągowym.

Stąd nasuwa się wniosek o konieczności stworzenia odpowiedniego schematu organizacyjnego, umożliwiającego efektywną współpracę instytutów badawczych z profesjonalnymi firmami informatycznymi i z przedsiębiorstwem wodociągowym, które zdecydowało się wprowadzać u siebie zaawansowaną informatyzację. Kolejnym koniecznym elementem takiego schematu jest podmiot finansujący badania rozwojowe.

Taki schemat opracowano w Instytucie Badań Systemowych PAN i wdrożono w Miejskim Przedsiębiorstwie Wodociągów i Kanalizacji Rzeszowie. Konstrukcja tego schematu jest następująca:

- prace prowadzone w Instytucie i współpracujących z nim jednostkach naukowo-badawczych dotyczą jedynie tworzenia algorytmów obliczeniowych do modelowania, symulacji komputerowej, optymalizacji i sterowania obiektami wodociągowymi;
- profesjonalne oprogramowanie opracowanych algorytmów jest zlecane zewnętrznym firmom informatycznym;
- testowanie i wdrażanie tworzonych produktów informatycznych jest wykonywane w przedsiębiorstwie wodociągowym, przy użyciu rzeczywistych danych;
- finansowanie współpracy jest prowadzone w ramach projektów celowych względnie rozwojowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Przedstawiony schemat organizacji współpracy, od pomysłu do wdrożenia, wiążący placówki naukowe, profesjonalne firmy informatyczne, przedsiębiorstwo i sponsora badań, można uważać za schemat modelowy. Jednak, w obecnej krajowej rzeczywistości prowadzenia badań stosowanych, ma on pewne słabe punkty, to znaczy:

- przedstawiony schemat integracyjny funkcjonuje poprawnie jedynie w przypadku, gdy istnieją już dłuższe i wzajemnie użyteczne kontakty między zainteresowanymi stronami; w przypadku takich kontaktów przedsiębiorstwo ma gwarancję, że współpracujące

podmioty wykonają swoje zadania rzetelnie i z korzyścią dla niego; brak tej pewności powoduje, że przedsiębiorstwo zwykle nie jest zainteresowane współpracą;

- w konstrukcji realizowanego obecnie przez MNiSW programu projektów celowych nie wywiązanie się jednostki naukowej z realizacji zadań badawczych skutkuje konsekwencjami finansowymi dla przedsiębiorstwa; wzbudza to zwykle niechęć przedsiębiorstw do zawierania umów o wykonanie takich celowych;
- mimo że projekty celowe są właściwie jedyną formą wspierania rzeczywistej współpracy między krajowymi placówkami naukowymi i przedsiębiorstwami, dofinansowywanej ze środków budżetowych, Ministerstwo bardzo rzadko organizuje konkursy na te projekty, co dodatkowo zniechęca do takiej współpracy przedsiębiorstwa, przyzwyczajone do szybkiego podejmowania decyzji i ich realizacji.

W wyniku tych 'słabych punktów' zaproponowanego schematu organizacyjnego prowadzenia prac badawczo-rozwojowych, przedsiębiorstwa wodociągowe rzadko decydują się na uczestniczenie w projektach celowych, szczególnie w ramach współpracy z takimi jednostkami naukowymi, które nie potrafią się już wykazać pozytywnymi wynikami badań stosowanych. Z kolei placówkom takim trudno jest zdobyć odpowiednie doświadczenie w tym zakresie, jeżeli nie mają okazji współpracy z przedsiębiorstwami. W ten sposób koło się zamyka i oba podmioty, naukowy i gospodarczy, zamiast ze sobą współpracować, działają w sposób niezależny, ze szkodą dla nauki i gospodarki w Polsce.

7. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania informacji, pozyskiwanych z systemu monitoringu do wspomagania zarządzania przedsiębiorstwem wodociągowym, w tym w szczególności usprawnienia eksploatacji sieci wodociągowej i także kanalizacyjnej, które stanowią główne obiekty wodociągowe. Jest to możliwe poprzez zintegrowanie pracy systemów monitoringu, mapy numerycznej, modeli hydraulicznych i algorytmów optymalizacji w ramach jednolitego kompleksowego systemu informatycznego wspomagania decyzji. Taka integracja pozwala na lepsze wykorzystanie informacji dostarczanych z systemu monitoringu i lepsze wykorzystanie wiedzy o przedsiębiorstwie i jego obiektach zgromadzonej w bazie systemu GIS.

Koncepcję takiego zintegrowanego systemu informatycznego opracowano w Instytucie Badań Systemowych PAN i częściowo zrealizowano w przedsiębiorstwie wodociągowym w Rzeszowie. Należy przy tym zaznaczyć, że realizacja takiego systemu wymaga ścisłej współpracy jednostki badawczej z profesjonalnymi firmami komputerowymi, tworzącymi standardowe oprogramowanie do określonych celów, które może stanowić, po pewnych zmianach, moduły składowe budowanego systemu informatycznego. Nie ma bowiem potrzeby ani sensu, aby wszystkie programy, w tym również takie, które markowe firmy komputerowe produkują w sposób seryjny już od wielu lat, rozwijać równolegle do tej produkcji w instytucie badawczym. W omawianym przypadku tworzenia zintegrowanego systemu informatycznego do kompleksowego zarządzania przedsiębiorstwem wodociągowym, Instytut Badań Systemowych współpracował:

- z firmą rozwijającą profesjonalne systemy GIS;
- z firmą rozwijającą profesjonalne systemy monitoringu (SCADA);

- z firmami informatycznymi tworzącymi profesjonalne oprogramowanie dostarczanych im algorytmów obliczeniowych;
- z przedsiębiorstwem wodociągowym.

Prace badawczo-rozwojowe związane z tworzeniem wspomnianego systemu informatycznego są ciągle prowadzone, powstające algorytmy i programy są modyfikowane i uzupełniane a same prace i są jeszcze dalekie od zakończenia. Ich ostatecznym celem jest stworzenie kompleksowego systemu obejmującego swym działaniem wszystkie obiekty przedsiębiorstwa, a więc stację ujęcia i uzdatniania wody, sieć wodociągową, sieć kanalizacyjną i oczyszczalnię ścieków.

W pracy przedstawiono koncepcję zintegrowanego systemu informatycznego do kompleksowego zarządzania miejskim przedsiębiorstwem wodociągowym oraz wymieniono już wykonane programy wchodzące w skład poszczególnych podsystemów tego systemu. Najbardziej zaawansowanym podsystemem jest system opracowany dla sieci wodociągowej, w którym większość planowanych programów jest już w wersji wdrożeniowej. Gorzej zaawansowane prace dotyczą pozostałych dwóch podsystemów, w których brakuje kluczowych modeli matematycznych dla odnośnych obiektów, to znaczy modelu hydraulicznego dla grawitacyjnej sieci kanalizacyjnej i skalibrowanego modelu fizykalnego dla oczyszczalni ścieków. Przedstawiono również koncepcję schematu organizacyjnego prowadzenia prac badawczych, umożliwiającego rzeczywistą i efektywną współpracę między krajowymi jednostkami naukowymi i przedsiębiorstwami. Udrożnienie takiego sposobu prowadzenia badań aplikacyjnych istotnie przyspieszy zaawansowana informatyzację krajowych przedsiębiorstw wodociągowych.

Literatura

1. Bałut A.: *Komputerowe wspomaganie w zarządzaniu systemami wodociągowymi.* Wodociągi i Kanalizacja, 12[70]2009, 36-38.
2. Bałut A., Urbaniak A.: *GIS w modelowaniu i analizie sieci wodociągowych.* Wodociągi i Kanalizacja, 1[71]2010, 24-26.
3. Barski A., Pawlak A., Studziński J.: *Komputerowy model hydrauliczny miejskiej sieci wodociągowej.* W: Badania operacyjne i systemowe: środowisko naturalne, przestrzeń, optymalizacja. PAN IBS, Seria Badania Systemowe, tom 63, 99-116, Warszawa 2008.
4. Bartkiewicz L.: *Modelowanie ilości ścieków dopływających do oczyszczalni.* Rozprawa doktorska, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Kielce 2010.
5. 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.
6. Bogdan L., Studzinski J.: *Mathematical models for hydraulic calculation and optimization of commnal waternets* .In: ESM 2008: Modeling and Simulation (Cyrille Bertelle and Aladdin Ayesh, Eds.) Le Havre (October) Université du Havre France.
7. Łomotowski J., Siwoń Z.: *Metodyka analizy danych pochodzących z monitoringu systemów wodociągowych i kanalizacyjnych.* Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 3'2010, 16-20.

8. Rojek I.: *Wspomaganie procesów podejmowania decyzji i sterowania w systemach o różnej skali złożoności z udziałem metod sztucznej inteligencji.* Wydawnictwu UKW, Bydgoszcz 2010.

9. Stachura M.: *Komputerowa symulacja i optymalizacja modelu oczyszczalni ścieków.* PAN IBS, Warszawa 2008.

10. Stachura M., Janiszowski K.: *Algorytmy regulacji automatycznej i sterowania miejską oczyszczalnią ścieków.* PAN IBS, Warszawa 2010 (*w druku*).

11. Studziński J.: *Modelowanie, identyfikacja i sterowanie miejską oczyszczalnią ścieków.* PAN IBS, Warszawa 2010.

12. 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.

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

14. Szetela R.: *Model dynamiczny oczyszczalni ścieków z osadem czynnym.* Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1990.

Computer aided management of the communal waterworks

Jan Studzinski
Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences
Newelska 6, PL 01-447 Warsaw
studzins@ibspan.waw.pl

Abstract

In the paper the possibilities of computer monitoring systems implemented in Polish waterworks are described. Their use there does not meet their big potentialities. The systems installed are used currently as self-contained programs for collecting the data of water production and of water pressures in area pump stations informing the water net operators about the general state of their object while they could and should be used as integral elements of information systems for computer aided waterworks management. Such the information systems are already under development and the tasks realized by the monitoring systems working in their structure are described in the paper.

In the paper also an idea of computer aided management of all objects of communal waterworks, i.e. of water network, wastewater network and of sewage treatment plant, is presented. The structure and the functions of the relevant information system under development, its key components and realized programs as well as the problems connected with their implementation are described.

Also an idea of organization of multilateral research directed on developing the software to support decisions making processes in communal waterworks is proposed.