

**Wiktor CHOTKOWSKI**

POLITECHNIKA GDAŃSKA

**Mieczysław A. BRDYŚ**

UNIVERSITY of BIRMINGHAM, POLITECHNIKA WARSZAWSKA

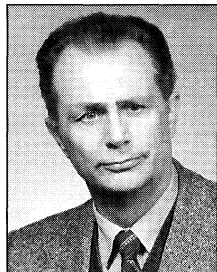
**Kazimierz DUZINKIEWICZ, Franciszek MILKIEWICZ**

POLITECHNIKA GDAŃSKA

## Struktury sterowania systemami wodociągowymi

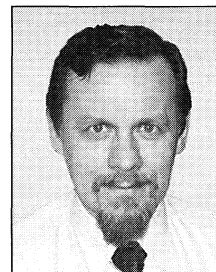
**Dr inż. Wiktor CHOTKOWSKI**

– adiunkt w Katedrze Automatyki na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1972 r. Zajmuje się zastosowaniami automatyki w przemyśle, a szczególnie w okrętownictwie i w gospodarce komunalnej. Specjalizuje się w problematyce automatyzacji systemów wodociągowych i kanalizacyjnych. W dorobku naukowym posiada przeszło 50 publikacji, 5 patentów oraz wdrożenia mikroprocesorowych systemów automatyki w stacjach uzdatniania wody i w oczyszczalniach ścieków.



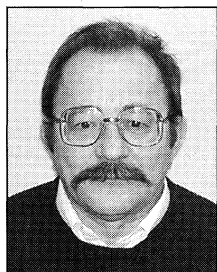
**Dr inż. Kazimierz DUZINKIEWICZ**

– adiunkt w Katedrze Automatyki Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Stopień naukowy doktora uzyskuje na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w roku 1982. Dorobek naukowy obejmuje publikacje z zakresu sterowania systemami złożonymi (przemysł petrochemiczny, systemy elektroenergetyczne, przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne), metod optymalizacji, analiz ryzyka dla obiektów technicznych oraz modelowania matematycznego. Aktualne zainteresowania koncentrują się na zastosowaniu metod sztucznej inteligencji w sterowaniu. Członek POLSPAR.



**Prof. dr hab. inż. Mieczysław A. BRDYŚ**

– profesor nadzwyczajny Politechniki Warszawskiej, zatrudniony w Katedrze Automatyki Politechniki Warszawskiej i w University of Birmingham w Wielkiej Brytanii. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1974 r., habilitował się w 1980 r., a tytuł naukowy profesora otrzymał w 1993 r. Posiada duży dorobek naukowy w zakresie problematyki teorii i zastosowań metod sterowania optymalnego ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień hierarchicznego sterowania dużymi systemami i sterowania obiektami nieliniowymi. Wyniki Jego prac są wdrażane w krajach Unii Europejskiej między innymi w systemach zaopatrzenia w wodę.



**Prof. dr hab. inż. Franciszek MILKIEWICZ**

– profesor zwyczajny Politechniki Gdańskiej; kierownik Katedry Automatyki na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Stopnie naukowe uzyskuje: doktora nauk technicznych - w 1962r., doktora habilitowanego - w 1969r. Tytuł naukowy profesora uzyskuje w 1985r. Posiada obszerny dorobek naukowy obejmujący prace z zakresu szeroko rozumianej automatyki, a w szczególności z zakresu inżynierii systemów; autor metody wielohorizontowego sterowania systemami gospodarczymi. Wdrożenia głównie w przemyśle petrochemicznym oraz w energetyce. Członek: Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, Gdańskiego Towarzystwa Naukowego, POLSPAR.



### Streszczenie

Stformulowano problem sterowania systemem wodociągowym. Określono zadania dla systemu sterowania, sposób oceny jakości sterowania oraz modele matematyczne procesów zachodzących w systemie wodociągowym. Uwzględniono uzależnienia między właściwościami hydraulicznymi a parametrami określającymi jakość wody. Przeprowadzono dekompozycję tego problemu na osi czasu i w przestrzeni sterowań. Przedstawiono uzyskane w ten sposób struktury sterowania.

### Abstract

Problem of control for drinking water system has been formulated. Tasks for control system were outlined along with a method of control quality evaluation and mathematical models of processes within the drinking water system. Addition between quantity and quality parameters were considered. Problem decomposition was carried out on both the time axis and control space. Control structures obtained in this way were shown.

**SŁOWA KLUCZOWE:** systemy wodociągowe, modelowanie, dekompozycja, sterowanie, optymalizacja

### Wprowadzenie

Przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne polskich miast stają się obecnie z dwoma wyzwaniami: nowa, od początku lat dziewięćdziesiątych sytuacja gospodarcza i własnościowa wymusza dążenie do obniżenia kosztów działalności, a aspiracje Polski do uzyskania członkostwa w Unii Europejskiej niosą konieczność doprowadzenia jakości wody dostarczanej odbiorcom do zgodności z normami obowiązującymi w Unii. Sprostaniu obu tym wyzwaniom mogą sprzyjać prace badawcze i wdrożeniowe w zakresie monitorowania, modelowania i sterowania produkcją i dystrybucją

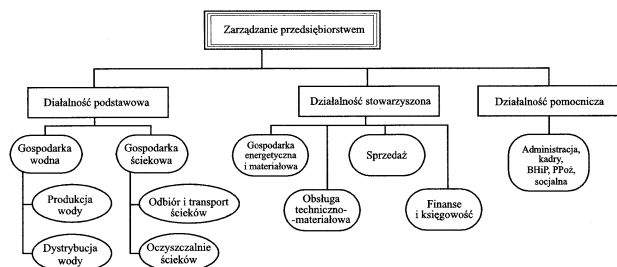
wody z uwzględnieniem parametrów charakteryzujących jej jakość oraz przy równoczesnym spełnieniu postulatów minimalizacji kosztów działalności przedsiębiorstwa.

Referat niniejszy jest poświęcony zagadnieniom formułowania problemu optymalizacji sterowania systemem wodociągowym i zagadnieniom dekompozycji otrzymanego stąd problemu decyzyjnego, a także wynikającym z niej strukturalom sterowania.

### Opis systemu wodociągowego

W przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych można wyodrębnić dwa rodzaje działalności podstawowej: zaopatrzenie odbiorców w wodę oraz odbiór i oczyszczanie ścieków. Przedsiębiorstwa te prowadzą również działalność stowarzyszoną, której celem jest utrzymanie wymaganego stanu technicznego systemu, dostawa materiałów i rozliczenie produkcji, oraz działalność pomocniczą, polegającą na zarządzaniu kadrą, zapewnieniu bezpieczeństwa i higieny pracy itp. Rodzaje działalności przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych przedstawiono na rysunku 1. Do realizacji wymienionych funkcji w poszczególnych przedsiębiorstwach przyjmują się różne schematy organizacyjne [9]. Działalność stowarzyszoną w części można przypisać produkcji i dystrybucji wody, a w pozostałej części - oczyszczaniu ścieków. Można zatem osobno rozpatrywać system wodociągowy i system kanalizacyjny, które wchodzą w skład tego samego przedsiębiorstwa.

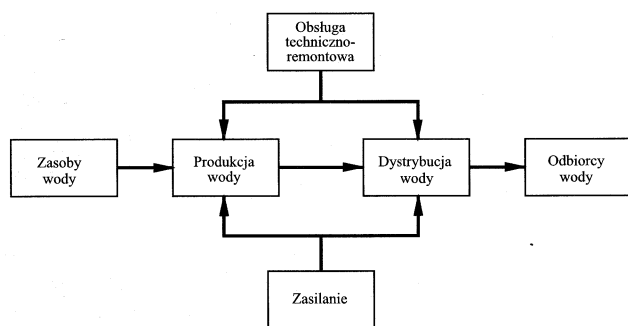
Dalsze rozważania będą dotyczyły systemu wodociągowego zaopatrującego miasto małej lub średniej wielkości w wodę z ujęć głębinowych. Poszczególne obiekty takiego systemu są rozmieszczo-



Rys. 1. Rodzaje działalności w przedsiębiorstwie wodociągowo-kanalizacyjnym

ne w terenie w znacznych odległościach. Podstawowym zadaniem systemu jest pokrycie bieżącego zapotrzebowania na wodę poszczególnych jej odbiorców przy zachowaniu wymagań ilościowych i jakościowych. W prezentowanym referacie, za obiekt sterowania przyjęto, zachodzące w systemie wodociągowym, procesy związane z zaopatrzeniem odbiorców w wodę. Schemat blokowy przedstawiający strukturę tych procesów pokazano na rysunku 2. Wyodrębniono na nim następujące procesy:

- produkcji wody - ujmowanie i uzdatnianie,
- dystrybucji wody - przepływy, pompowanie i podnoszenie ciśnienia wody w sieci wodociągowej, gromadzenie wody w zbiornikach retencyjnych,
- zasilania obiektów wodociągowych w energię elektryczną,
- obsługi techniczno-remontowej - remonty obiektów i sieci oraz płukanie sieci.



Rys. 2. Struktura obiektu sterowania

Zasoby wody, jej odbiorcy i dyrekcja przedsiębiorstwa ze służbami finansowymi, księgowymi i służbami obsługującymi sprzedaż, stanowią bliższe otoczenie systemowe. Na nie zaś oddziałuje środowisko naturalne i środowisko stworzone przez człowieka, które można uważać za dalsze otoczenie systemowe. Dyrekcja przedsiębiorstwa oddziałuje na system wodociągowy przez podejmowanie decyzji o charakterze inwestycyjnym i modernizacyjnym, które mają wpływ na strukturę systemu. Podejmuje też decyzje dotyczące zawierania umów na dostawę wody, zakup energii elektrycznej i materiałów eksploatacyjnych.

Oddziaływanie dyrekcji odbywa się również przez określanie globalnych zadań produkcyjnych, wynikających z zawieranych umów, a także przez prowadzenie polityki cenowej. Decyzje podejmowane przez dyrekcję dotyczą zwykle długich horyzontów czasowych. Dyrekcja przedsiębiorstwa sprawuje też bieżący nadzór nad działaniem systemu wodociągowego. Odbiera i analizuje dane o wielkości i o jakości produkcji, o kosztach produkcji oraz o stanie technicznym urządzeń i obiektów technologicznych, oraz o awariach występujących w systemie.

Na poziomie jednostki organizacyjnej, zarządzającej gospodarką wodną w przedsiębiorstwie, podejmuje się decyzje dotyczące planowania remontów obiektów i urządzeń technologicznych oraz harmonogramów płukania sieci wodociągowej. Decyzje te powodują czasową zmianę struktury systemu wodociągowego, a są

podejmowane z rocznym lub kilkumiesięcznym horyzontem decyzyjnym.

Na tym poziomie i w poszczególnych obiektach systemu wodociągowego podejmuje się też decyzje będące przedmiotem sterowania operatywnego, którego zadaniem jest zapewnienie dostaw wody zgodnie ze zmieniającym się w czasie zapotrzebowaniem odbiorców. Naturalnym horyzontem czasowym tych decyzji jest okres jednej doby. Dotyczą one między innymi przydziału zadań produkcyjnych poszczególnym obiektom systemu wodociągowego. Zapotrzebowanie odbiorców zależy od godziny, dnia tygodnia oraz od pory roku. Wpływ na nie mają: rozkład dnia odbiorców, zadania przez nich wykonywane oraz oddziaływanie czynników takich jak: temperatura, występowanie opadów itp. Na tym poziomie mogą być również podejmowane decyzje dotyczące konieczności dezynfekcji sieci wodociągowej. Aspekt technicznej realizacji sterowania systemem wodociągowym przedstawiono w pracy [3].

W dalszej części referatu zajęto się problemami modelowania systemu wodociągowego i sterowania tym systemem. Określono zadanie sterowania, scharakteryzowano model matematyczny i przeanalizowano możliwości dekompozycji problemu sterowania.

### Określenie zadania i funkcji celu systemu sterowania

Podstawowym zadaniem systemu sterowania jest wygenerowanie takiego wektora sterowania, który zapewni realizację zadań produkcyjnych przez system wodociągowy, tj. dostawę wody do odbiorców przy zachowaniu wymaganych jej parametrów ilościowych i jakościowych, przy spełnieniu ograniczeń wewnętrznych i zewnętrznych systemu oraz przy równoczesnej minimalizacji kosztów działania systemu. Dodatkowym zadaniem systemu sterowania jest tworzenie harmonogramów działań renowacyjnych i regeneracyjnych.

Naturalną miarą jakości działalności systemu jest zysk ze sprzedaży wody równy przychodowi pomniejszonemu o sumę kosztów. Decyzje o cenie wody są podejmowane na wniosek dyrekcji przedsiębiorstwa przez właściciela wodociągów, czyli poza systemem wodociągowym. Za miarę jakości realizacji zadania, tj. za funkcję celu przyjmuje się więc sumę kosztów zmiennych.

Całkowite koszty zmienne działania systemu wodociągowego stanowią sumę kosztów: energii elektrycznej, materiałów, robocizny i sprzętu oraz kar za niespełnienie wymagań dotyczących dostarczonej wody.

Dostarczanie i rozliczanie energii elektrycznej odbywa się na podstawie umowy między zakładem energetycznym a jej odbiorcą. Umowę taką zawiera się zwykle na okres roku. Obowiązujący system opłat daje odbiorcy możliwość wyboru taryfy opłat, przy ograniczeniach określonych napięciem zasilania i pobieraną mocą lub ilością zużywanej energii. Warunki te kwalifikują obiekty wodociągowe do grupy odbiorców, dla których przewiduje się taryfy dwuczłonowe z osobnym rozliczeniem za moc dostarczoną i za zużytą energię.

Inną grupą kosztów, mającą wpływ na podejmowanie decyzji eksploatacyjnych, są koszty materiałów i sprzętu używanych do remontów obiektów i do płukania sieci wodociągowej oraz koszty robocizny związanej z tą działalnością. Wysokość tych kosztów nie zależy w sposób bezpośredni od ilości produkowanej wody, a od zakresu prac remontowych lub płukania sieci.

### Modelowanie systemu wodociągowego

Niżej zostaną przeanalizowane procesy zachodzące w systemach wodociągowych podczas produkcji i dystrybucji wody. Analizie zostaną poddane modele matematyczne tych procesów oraz parametry opisujące właściwości hydrauliczne i jakość wody dostarczanej do odbiorców. Modele hydrauliczne systemu wodociągowego, opisujące przepływy i ciśnienia w systemie, składają się z: modeli studni głębinowych, modeli sieci wewnętrznych ujęć wody, modeli sta-

cji uzdatniania wody, pompowni, zbiorników oraz sieci dystrybucyjnej.

Zapotrzebowanie na wodę determinuje wielkość jej poboru przez ujęcia systemu wodociągowego i wpływa na sposób eksploatacji zasobów. Sformułowanie modelu matematycznego opisującego właściwości hydrauliczne ujęcia wymaga zatem podania modelu złoża, modeli poszczególnych studni głębinowych i modelu sieci wewnętrznej ujęcia.

Model złoża opisuje przepływy wody i zmiany położenia jej zwierciadła w złożu, występujące zwłaszcza w otoczeniu studni głębinowych. Wyraża się on za pomocą nieliniowego, cząstkowego równania różniczkowego. Nawet przy właściwej eksploatacji złoża, w dłuższym horyzoncie czasowym, modelowany proces ma charakter niestacjonarny. Zwiększanie poboru wody przez studnie głębinowe powoduje obniżanie się dynamicznego zwierciadła wody w złożu, a w konsekwencji, w dłuższym horyzoncie czasowym, może być przyczyną wystąpienia zjawiska infiltracji zanieczyszczeń do złoża i pogorszenia jakości ujmowanej wody. Zjawisko to wiąże się z interakcją między złożem a środowiskiem. Jakość ujmowanej wody jest też uzależniona od czasu trwania przerw w pracy pomp studni głębinowych oraz od częstości i sposobu ich rozruchów i zatrzymań.

Modele matematyczne poszczególnych pomp studni głębinowych, wchodzących w skład ujęcia można wyrazić w postaci zależności, określanych mianem charakterystyk wydatku pomp. Charakterystyki te przedstawiają zależność wysokości podnoszenia pompy od jej wydatku przy ustalonej prędkości kątowej. Interakcja między poszczególnymi studniami zachodzi zarówno w złożu, jak i w rurociągu tłocznym. Działanie każdej z pomp ujęcia powoduje wytworzenie się dynamicznego zwierciadła wody, które może wpływać na poziom wody w otoczeniu innych studni głębinowych ujęcia. Wpływ ten jest tym silniejszy, im odległość między studniami jest mniejsza. Interakcja w przewodzie tłocznym objawia się we wzajemnym tłumieniu wydatków przez studnie głębinowe podłączone do wspólnego rurociągu tłocznego.

Kolejna faza procesu produkcji wody, w przypadku ujęć wód podziemnych - uzdatnianie wody - sprowadza się zwykle do napowietrzania i filtracji wody, a w razie potrzeby do jej dezynfekcji. Napowietrzanie i dezynfekcja są procesami mieszania, które można opisać równaniami różniczkowymi pierwszego rzędu, a proces filtracji opisuje się równaniem różniczkowym cząstkowym. Modelowanie pracy filtrów komplikuje dodatkowo konieczność uwzględnienia procesu ich płukania.

Modele matematyczne sieci wewnętrznych ujęć wody i sieci dystrybucyjnych mają podobną postać. Podstawą tych modeli są równania bilansu dla poszczególnych punktów węzłowych i równania zachowania energii dla poszczególnych pętli modelowanej sieci. W równaniach bilansu masy wyznacza się sumy algebraiczne natężeń dopływów i odpływów w każdym węźle sieci. W równaniach zachowania energii uwzględnia się spadki ciśnienia we wszystkich odcinkach rozpatrywanej pętli oraz spadki ciśnienia na znajdującej się w pętli armaturze i pompach. Przyjmuje się, że spadek ciśnienia w rurociągu jest proporcjonalny do kwadratu natężenia przepływu. Przy rozpatrywaniu stanów ustalonych opisuje się właściwości statyczne sieci wodociągowej. Wyodrębnionymi elementami sieci są zbiorniki wody posiadające właściwości dynamiczne. Metody modelowania większości przedstawionych wyżej procesów hydraulicznych zachodzących w systemie wodociągowym są już powszechnie znane i istnieją opracowane do tego celu efektywne narzędzia obliczeniowe [6].

Do ważniejszych wymagań określających jakość wody zalicza się zawartość zanieczyszczeń: nieorganicznych, organicznych i mikrobiologicznych. Powszechnie określa się parametry fizyczne i chemiczne wody, takie jak stężenie: chloru, żelaza, manganu, związków azotu, metali ciężkich oraz jak: wartość wskaźnika pH, mętność, wiek wody itp. Oznacza się również właściwości mikrobiologiczne wody. W ostatnich latach problematyka modelowania jakości wody jest przedmiotem licznych badań [6], [7]. Jeżeli założyć, że nie ma interakcji pomiędzy poszczególnymi parametrami charak-

teryzującymi jakość wody, to wystarczy rozważać równanie tylko dla jednego z tych parametrów. W celu uwzględnienia jakości wody podczas sterowania systemem wodociągowym zaproponowano [2] uzupełnienie modeli matematycznych, opisujących przepływy i rozkład ciśnień w systemie, zależnościami łączącymi ilościowe i jakościowe parametry wody. Zależności te sformułowano dla poszczególnych zbiorników retencyjnych, węzłów sieci dystrybucyjnej i procesów rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w sieci wodociągowej. W przypadku zbiorników i sieci dystrybucyjnej do utworzenia modelu wykorzystano równania bilansu masy, które zastosowano do opisu procesu mieszania się wody o różnej jakości. Za zależność wiążącą parametry jakościowe i ilościowe wody w rurociągu przyjęto równanie różniczkowe opisujące zmiany parametrów jakościowych w czasie. Zależność ta charakteryzuje właściwości dynamiczne procesu. Jest ona funkcją przebytej przez wodę drogi i zależy od przebiegu reakcji kinetycznej zachodzącej między zanieczyszczeniem znajdującymi się w wodzie a osadami na ściankach rurociągu. Równanie to zostało wyprowadzone przez Rossmanna [7]; ma ono postać:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} + v(t) \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} - R[c(x,t)] = 0$$

gdzie:  $x$  - odległość punktu bieżącego od początku rurociągu,  $t$  - czas,  $v(t)$  - prędkość przepływu wody w chwili  $t$ ,  $c(x,t)$  - stężenie zanieczyszczenia jako funkcja odległości i czasu,  $R(\bullet)$  - szybkość reakcji będąca funkcją stężenia.

Równanie to zwykle rozwiązuje się dla przypadku, w którym szybkość reakcji, określona funkcją  $R(\bullet)$ , jest liniowa względem  $c(x,t)$ , czyli może być wyrażona w postaci:

$$R(c(x,t)) = kc(x,t)$$

przy czym:  $k$  jest współczynnikiem szybkości reakcji zależnym od prędkości przepływu w rurociągu. Jak widać występuje tu istotna interakcja między natężeniem przepływu a stężeniem zanieczyszczenia w wodzie. Fakt ten może być wykorzystany do integracji parametrów jakościowych i ilościowych przy wyznaczaniu wektora sterowania systemem wodociągowym.

Przedstawiona powyżej linowa postać funkcji  $R(\bullet)$  jest przybliżeniem rzeczywistości, które często jest wystarczająco dokładne. Należy się jednak liczyć z możliwością wystąpienia znaczących błędów przy takiej aproksymacji. Interesującym uogólnieniem jest tu uzależnienie stałej  $k$  od parametrów jakości wody, np. od stężenia oraz gradientu stężenia wybranego parametru. Podejście takie zaprezentowano przy modelowaniu stężenia chloru w wodzie do celów sterowania [8]. Uzyskano dobre wyniki modelowania dzięki zastosowaniu kilku różnych wartości stałej  $k$  w zależności od wartości gradientu stężenia chloru.

Problem zintegrowanego sterowania ilością i jakością wody, z punktu widzenia potrzeb praktycznych, jest obecnie jednym z najważniejszych problemów do rozwiązania.

### Sformułowanie i charakterystyka problemu sterowania

Należy zrealizować podstawowe zadanie systemu wodociągowego przy zachowaniu ograniczeń równościowych, wynikających z modeli matematycznych rozpatrywanych procesów i ograniczeń nierównościowych, określonych przez parametry techniczne i technologiczne systemu wodociągowego oraz warunki i wymagania zewnętrzne, związane głównie ze środowiskiem naturalnym, tak aby funkcja celu, określająca koszty zmienne realizacji tego zadania, osiągnęła wartość minimalną w przyjętym przedziale czasowym optymalizacji.

Przedstawiony tu problem sterowania systemem wodociągowym jest problemem optymalizacji dynamicznej. Jak wynika z przeprowadzonej powyżej analizy, model matematyczny procesu zawiera równania różniczkowe zwyczajne i cząstkowe oraz równania algebraiczne. Dynamika rozpatrywanego procesu ma więc częściowo charakter skupiony, a częściowo - rozłożony. Należy podkreślić, że szybkości zmian wielkości w modelowanych procesach znacznie różnią się od siebie. Modele matematyczne procesów zawierają też wiele elementów o wyraźnie występujących nieliniowościach.

Za zmienne decyzyjne w naturalny sposób można przyjąć:

- natężenia przepływu wody produkowanej przez poszczególne ujęcia i uzdatnianej przez stacje uzdatniania,
- natężenia przepływu wody pobieranej ze studzien głębinowych,
- ciśnienia wody na wejściach do sieci dystrybucyjnej oraz w wybranych punktach sieci i węzłach technologicznych,
- chwile załączeń i wyłączeń poszczególnych pomp głębinowych i urządzeń technologicznych w stacjach uzdatniania wody,
- prędkości kątowe pomp,
- wielkości zadane dla stacji chlorowania wody, jeżeli sterowanie systemem wodociągowym odbywa się w układzie zamkniętym lub trajektorie sterowań, jeżeli układ sterowania jest otwarty – wielkościami tymi mogą być np. czas i intensywność dozowania chloru,
- harmonogramy remontów,
- harmonogramy płukania rurociągów, jeżeli w systemie wodociągowym nie stosuje się dezynfekcji,
- parametry charakteryzujące wielkość zakupów energii elektrycznej i materiałów eksploatacyjnych,
- parametry charakteryzujące sprzedaż wody,
- parametry określające jakość wody na wejściu do sieci dystrybucyjnej.

Łatwo zauważyć, że zmienne decyzyjne są hybrydowe; w części są to zmienne ciągłe, jak np. natężenie przepływu, ciśnienie itp., a część z nich – ma charakter zmiennych dwustanowych (załączenia i wyłączenia urządzeń).

W rozpatrywanym zadaniu optymalizacji występują elementy niepewności. Mogą dotyczyć one przyjętych struktur oraz wartości parametrów modeli matematycznych, jak np. wartości współczynników oporności hydraulicznej rurociągów, współczynników w równaniach kinetyki reakcji itp. Są też spowodowane błędami modelowania i pomiarów wielkości określających stan procesu, a także błędami prognozowania wielkości wejściowych i wyjściowych. Dodatkowym utrudnieniem jest tu całkowita lub częściowa niedostępność niektórych wielkości określających stan systemu wodociągowego. Odnosi się to do parametrów hydraulicznych, a zwłaszcza do parametrów określających jakość wody w różnych punktach sieci dystrybucyjnej, wśród których należy wymienić odbiorców rozproszonych. Wymienione cechy zadania optymalizacji sterowania w systemie wodociągowym stanowią istotną przesłankę do wykorzystania w tym zadaniu algorytmów predykcji do prognozowania funkcji czasu zapotrzebowania na wodę i innych wielkości wejściowych oraz algorytmów estymacji stanu.

Zadanie optymalizacji sterowania operatywnego systemem wodociągowym powinno być rozwiązywane dla przedziałów czasowych o różnej długości przy przesuwającym się horyzoncie sterowania. Rozwiązywanie tego zadania powinno odbywać się repetycyjnie, w miarę aktualizacji danych. System sterowania, z wyżej przedstawionym zadaniem nie może pracować w pełni autonomicznie. Może on działać w trybie doradczym. Przykładowo, operator może stosować go do weryfikacji zamierzonych przez siebie działań sterowniczych. Proponowane przez system doradcy rozwiązanie będzie zawierało informacje o stanie procesu w przypadku jego realizacji.

Istotnym elementem takiego systemu sterowania jest podsystem gromadzenia danych i akwizycji wiedzy, który zawiera dane i reguły decyzyjne wykorzystywane podczas generowania sterowań przez ten system. Bazy danych i wiedzy są modyfikowane w czasie działania systemu. Następuje to szczególnie, gdy przy niezmienniej

strategii sterowania okaże się, że w obiekcie sterowania wystąpi stan zakłóceniu polegający np.: na wycieku wody z sieci, przelaniu zbiornika, przekroczeniu ograniczeń na stężenie chloru, czy też na wystąpieniu niestabilności biologicznej wody. Jeżeli działania podjęte przez operatora przy udziale systemu sterowania okażą się w takiej sytuacji skuteczne, to powstaną przesłanki do uzupełnienia bazy danych i bazy wiedzy systemu. Bazy te będą więc zawierały dane określające wartości zmiennych wejściowych, stan obiektu i reakcje operatora w szczególnych sytuacjach zakłóceń, które nie zostały przewidziane w fazie projektowania systemu sterowania. Dane takie, po wprowadzeniu do bazy systemu i utworzeniu odpowiednich reguł decyzyjnych, w podobnych sytuacjach można będzie stosować automatycznie. Przedstawiony tu podsystem gromadzenia danych i akwizycji wiedzy ma cechy systemu inteligentnego.

Dużego znaczenia nabiera również problem uwzględniania niepewności w systemach sterowania. Posługiwanie się modelami probabilistycznymi jest obecnie często krytykowane. Brak wiarygodnych metod kwantyfikowania niepewności, umożliwiających określenie ryzyka związanego z konkretnymi decyzjami sterującymi, hamował i w dalszym ciągu hamuje rozwój podejść modelowych w podejmowaniu decyzji w systemach wodociągowych. Potrzebna jest tu wszechstronna analiza metod modelowania niepewności poczynając od ujęć probabilistycznych i rozmytych, a skończywszy na takich podejściach, które umożliwiają pełne wykorzystanie informacji. Na przykład, powinna istnieć możliwość wyznaczenia prawdopodobieństwa zdarzeń rozmytych, czy też zastosowania teorii możliwości do oszacowania rozkładów prawdopodobieństwa. Można będzie wtedy wykorzystać wiedzę dotyczącą jakościowych parametrów wody, co pozwoli na skuteczne zredukowanie niepewności w modelowaniu systemów wodociągowych.

## Dekompozycja problemu sterowania

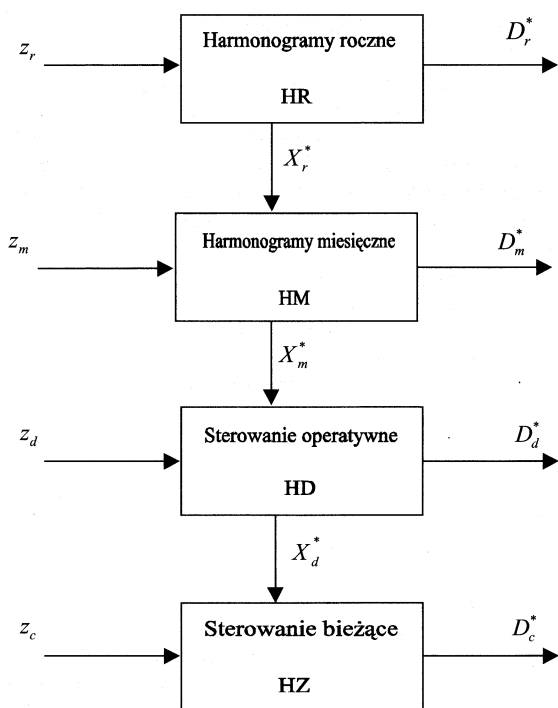
Z przedstawionych uwarunkowań podejmowania decyzji eksploatacyjnych w systemie wodociągowym wynika celowość zastosowania metody dekompozycji przy tworzeniu systemu sterowania. Zdefiniowany powyżej problem sterowania systemem wodociągowym może zostać zdekomponowany na osi czasu – przy zastosowaniu podejścia wielohoryzontowego i w przestrzeni sterowań – z uwzględnieniem struktury obiektu i struktury zarządzania przedsiębiorstwem.

Dodatkowymi przesłankami, przemawiającymi za zastosowaniem dekompozycji w rozpatrywanym problemie sterowania systemem wodociągowym, są:

- zwiększenie niezawodności działania systemu wodociągowego, w stosunku do sterowania centralnego,
- zmniejszenie ilości informacji przesyłanych między obiektami wodociągowymi a dyspozytornią centralną systemu.

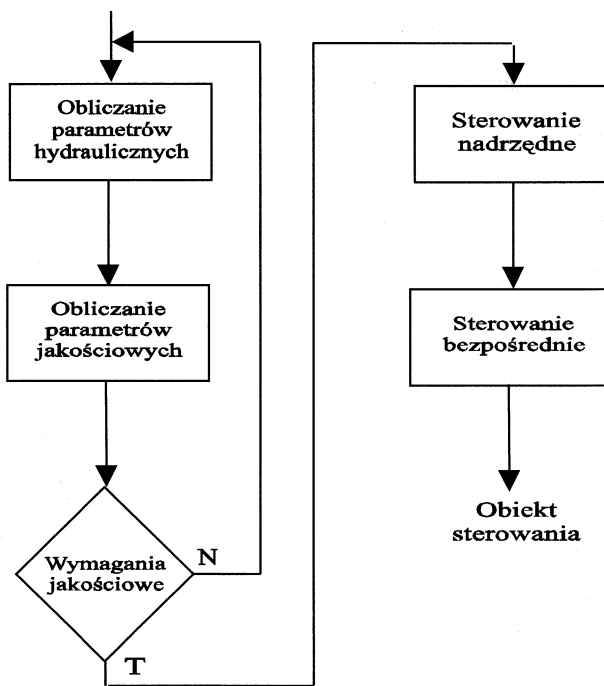
Dekompozycja problemu sterowania na osi czasu polega na zastąpieniu ogólnego sformułowania tego problemu ciągiem kolejno rozwiązywanych podproblemów definiowanych dla częściowych horyzontów czasowych sterowania. W pracach Milkiewicza [4], [5] wykazano, że horyzonty sterowania powinny być dobierane z uwzględnieniem stosowanych w przedsiębiorstwie okresów planowania działalności. W przypadku systemów wodociągowych, dla których strukturę sterowania przedstawiono na rysunku 3, wchodzi w rachubę przyjęcie czterech horyzontów sterowania:

- rocznego HR - związanego głównie z umowami na dostawę wody, zakup energii elektrycznej i materiałów eksploatacyjnych oraz planowaniem remontów i płukania sieci,
- miesięcznego HM - związanego ze sprawozdawczością oraz okresem rozliczeniowym sprzedaży wody i zakupu energii elektrycznej,
- dobowego HD - związanego z cykliczną zmianą rozbioru wody,
- zerowego HZ - związanego ze sterowaniem wartościami chwilowymi parametrów określających produkcję i dystrybucję wody.



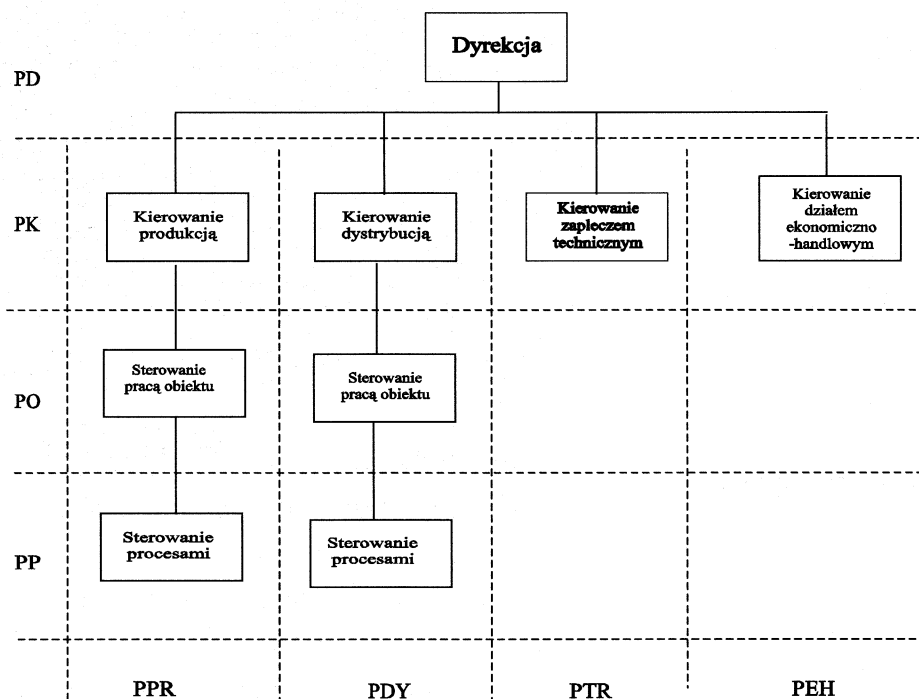
Rys. 3. Dekompozycja problemu sterowania na osi czasu

W przedstawionej strukturze, najpierw rozwiązuje się problem sterowania dla horyzontu rocznego HR. Wykorzystuje się do tego celu ogólny model procesu i roczne prognozy zapotrzebowania na wodę, energię elektryczną i materiały eksploatacyjne, a także przewidywane potrzeby i możliwości w zakresie remontów. Na tej podstawie wyznacza się optymalny wektor sterowania i optymalny wektor stanu. Wartość tego ostatniego wektora, dla chwili czasu odpowiadającej chwili zakończenia okresu sterowania o horyzoncie



Rys. 5. Struktura sterowania na poziomie obiektu technologicznego

miesięcznym, jest zmienną koordynacyjną, stanowiącą zadanie dla problemu sterowania rozwiązywanego z horyzontem miesięcznym HM. W wyniku rozwiązania problemu o horyzoncie miesięcznym otrzymuje się optymalne wartości wektora sterowania i wektora stanu dla tego horyzontu sterowania. Podobnie postępuje się dla horyzontu dobowego HD, a wyznaczony, optymalny wektor sterowania jest wektorem zadanym dla problemu sterowania o horyzoncie zerowym HZ.



Rys. 4. Dekompozycja problemu sterowania w przestrzeni sterowań

Dekompozycja problemu sterowania systemem wodociągowym w przestrzeni sterowań jest spowodowana potrzebą uwzględnienia:

- wymienionych wyżej rodzajów działalności, niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjnego,
- dużą liczbą i różnorodnością decyzji podejmowanych w ramach każdego rodzaju działalności.

Pierwsza z wymienionych przyczyn prowadzi do dekompozycji problemu na tzw. pion działalności. Druga przyczyna prowadzi do dekompozycji wielopoziomowej, w której każdy niższy poziom decyzyjny jest podporządkowany poziomowi wyższemu. Dekompozycja taka jest przeprowadzana dla każdego pionu działalności przedsiębiorstwa i dla każdego horyzontu czasowego sterowania. Na rysunku 4 przedstawiono strukturę sterowania przedsiębiorstwem wodociągowo-kanalizacyjnym, w której wyodrębniono:

- dwa piony działalności podstawowej – pion produkcji PPR i pion dystrybucji PDY wody,

- dwa piony działalności stowarzyszonej – pion zaplecza techniczno-remontowego PTR i pion ekonomiczno-handlowy PEH,
- cztery poziomy - poziom dyrekcyj PD, poziom kierowania działaniami PK, poziom sterowania obiektami PO, poziom sterowania procesami PP.

Wstępujące w przedsiębiorstwie powiązania informacyjne między poszczególnymi pionami działalności podstawowej i działalności stowarzyszonej mają istotny wpływ na sposób podejmowania decyzji [4]. Najpierw rozwiązuje się problem sterowania działalnością podstawową z uwzględnieniem związanych z nią decyzji dotyczących działalności stowarzyszonej. Następnie, wykorzystując otrzymane wyniki, przechodzi się do równoległego rozwiązania problemów sterowania działalnością podstawową i działalnością stowarzyszoną. Podobne podejście można zastosować w celu uwzględnienia sprzężeń między pionem produkcji a pionem jej dystrybucji. W tym przypadku, rozwiązuje się problem sterowania procesem dystrybucji wody. Problem ten można rozwiązać kaskadowo w dwóch etapach. W pierwszym etapie można wyznaczyć natężenia przepływów jedynie na podstawie modeli hydraulicznych systemu wodociągowego. W drugim – wykorzystując wyniki etapu pierwszego i modele parametrów jakościowych – należy sprawdzić spełnienie wymagań jakościowych. W przypadku spełnienia ich, można przejść do rozwiązywania następných problemów sterowania. W przeciwnym przypadku należy skorygować przepływ w systemie rozwiązując ponownie zadanie z etapu pierwszego. Po zrealizowaniu tej procedury otrzymuje się zadania dla poszczególnych obiektów pionu produkcyjnego i przechodzi się do równoległego rozwiązania problemów sterowania tymi obiektami. W każdym z obiektów ustala się najpierw wartości zadane, a następnie steruje się bezpośrednio urządzeniami technologicznymi. Podczas ustalania wartości zadanych, podobnie jak i poprzednio, można uwzględnić ograniczenia jakościowe (rys. 5). Przedstawione tu rozwiązania prowadzi do rozwiązania suboptymalnego i konieczności wyposażenia algorytmu sterowania w odpowiednie algorytmy korekcji.

## Komputerowe Systemy Pomiarowe i Stacje Prób do Kontroli Jakości

przeznaczone do pracy przy taśmie produkcyjnej lub w laboratorium:

- pomiary rezystancji obwodu ochronnego, wytrzymałości napięciowej, prądu upływu, mocy, rezystancji uzwojeń pod napięciem itd.
- pełna automatyka testu
- programowanie parametrów testu zależnie od typu wyrobu
- archiwizacja wyników testu i numeru wyrobu
- zabudowa w szafie 19"

Posiadamy referencje renomowanych firm pracujących na naszych stacjach prób.

**mescomp**

tel. (0-65) 512 16 94

os. Jagiellońskie 7

64-000 Kościan

## Literatura

- [1] M. A. BRDYS, H. PUTA, ARNOLD E., K. CHEN, S. HOPFGARTEN: Operational control of integrated quality and quantity in water systems. In P. D. Roberts and J. E. Ellis, editors, Large Scale Systems: Theory and Applications. IFAC/IFORS/IMACS Symposium, vol. 2, 715-722, London 1995.
- [2] M. A. BRDYS, E. ARNOLD, H. PUTA, K. CHEN, S. HOPFGARTEN: Integration Quantity and Quality in Operational Control of Water Systems (w druku).
- [3] W. CHOTKOWSKI, K. DUZINKIEWICZ: Automatyzacja ujęć i stacji uzdatniania wody. [W]: Materiały Seminarium nt. Technologia i Automatyzacja Systemów Wodociągowych i Kanalizacyjnych. Politechnika Gdańska, Sopot, 13-14 czerwca 1996.
- [4] F. MILKIEWICZ: Sterowanie systemami produkcyjnymi. [W]: Materiały XI-II Krajowej Konferencji Automatyki. Opole 1999.
- [5] F. MILKIEWICZ, L. STOLC: Wspomagane komputerowo wielohoryzontowe sterowanie w wybranych klasach systemów. Raport techniczny Katedry Automatyki PG, Gdańsk 1984.
- [6] L. A. ROSSEMAN: EPANET Users Manual. United States Environment Protection Agency, 1993.
- [7] L. A. ROSSMAN, F. M. CLARK, W. M. GRAYMAN: Modelling chlorine residuals in drinking water distribution systems. J. Envir. Engrg., 120 (4), 67-77, 1994.
- [8] S. SCHNEIDER, M. A. BRDYS, H. PUTA, S. HOPFGARTEN: Modelling of chlorine concentration in water supply systems directed to integrated operational control. In B. Coulbeck, editor, Integrated Computer Applications in Water Supply, vol. 2, 143-159. Research Studies Press, 1993.
- [9] Zasady eksploatacji i sterowania urządzeniami systemów wodociągowych i kanalizacyjnych. T. III. Praca zbiorowa pod red. K. Dohnalika Instytut Kształtowania Środowiska w Krakowie. Praca wykonana w ramach „Rządowego programu badawczego - rozwojowego” PR-7, kierunek 03. Kraków 1987.

Artykuł recenzowany

## karty pomiarowe



**AXIOM**  
MEASUREMENT & CONTROL

karty pomiarowe firmy

obudowy 19" komputerów i monitorów

szufladki 19" na klawiaturę

klawiatury wodoodporne i membranowe

karty wieloportowe RS232 i RS485

konwertery RS232 na RS485 i pętlę prąd.

**OPTIMUS-SEKO**

43-300 Bielsko-Biała, ul. Jutrzenki 20  
tel. (039) 124160, (033) 140101, fax (033) 140071  
e-mail: osek@onet.pl http://www.seko.com.pl