

Urszula SZTWIERTNIA-POCIASK  
Instytut Automatyki  
Politechnika Śląska

MOŻLIWOŚCI STEROWANIA PODSYSTEMEM ZAOPATRZENIA W WODĘ SYSTEMU WODNO-  
GOSPODARCZEGO wg PR-7.05

**Streszczenie.** W referacie omówiono prace z zakresu sterowania podsystemem zaopatrzenia w wodę w systemie wodno-gospodarczym zrealizowane w Instytucie Automatyki. Prace te dotyczą modeli matematycznych i algorytmów optymalnego sterowania poszczególnymi obiektami oraz układem wodociagowym obejmującym kilka obiektów. Sterowanie optymalne zostało oparte o minimalizację wskaźnika jakości określonego przez koszt energii elektrycznej.

1. Wstęp

W ostatnim pięcioleciu Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej prowadził prace w kierunku O5 programu rządowego PR-7 pt. "Opracowanie koncepcji kompleksowej automatyzacji elementów systemu rozrządu i dystrybucji oraz przeprowadzenie badań niezbędnych do jej wprowadzenia" (Zadanie PR-7.05.01.06). Zgodnie z założeniami pracy jednym z celów było opracowanie modeli matematycznych i algorytmów sterowania obiektami technologicznymi podsystemu zaopatrzenia.

Opracowanie dla celów sterowania modelu analitycznego procesów uzdatniania wody, pompowania czy transportu wody w rozgałęzionych sieciach wodociagowych wymaga znajomości jakościowej i ilościowej zjawisk fizykochemicznych zachodzących w tych procesach. Przyczyny te sprawiły, że modele matematyczne dla konkretnych obiektów muszą być opracowywane na drodze analitycznej oraz na podstawie danych o wartościach zmiennych procesowych zebranych podczas eksperymentu. Praktycznie nie wyznacza się pełnego opisu matematycznego, obejmującego wszystkie własności obiektów, lecz tworzy się modele fragmentaryczne przeznaczone dla konkretnych potrzeb. W koncepcji sterowania systemem wodno-gospodarczym przedstawionej w [1] cele funkcjonowania podsystemu zaopatrzenia zostały sformułowane w następujący sposób :

- optymalne wg kryteriów kosztów funkcjonowanie podsystemu i obiektów technologicznych,
- uzdatnianie wody pobieranej z ujęcia i dostarczenie jej do sieci wodo-

ciągowej zgodnie z potrzebami,

- okresowe magazynowanie zasobów wody w zbiornikach terenowych dla wyrównania okresowych zwiększonych poborów wody.

Do obiektów podsystemu zaopatrzenia należą następujące obiekty :

- pompownie,
- stacje uzdatniania wody,
- zbiorniki terenowe,
- sieć rurociągów rozprowadzających wodę.

Do chwili obecnej zostały opracowane modele matematyczne wybranych obiektów i algorytmy optymalnego sterowania oraz przeprowadzono ich weryfikację na przykładzie obiektów pilotujących.

## 2. Modele matematyczne obiektów podsystemu zaopatrzenia

### 2.1. Model matematyczny pompowni

Ze względu na współpracę przepompowni z elementami sieci dystrybucji wody przepompownie można podzielić na trzy grupy :

- współpracujące ze zbiornikiem sieciowym,
- pobierające wodę ze zbiornika i tłoczące ją do sieci,
- podtrzymujące ciśnienie w sieci (nie posiadają zbiornika dolnego).

Przepompownie na terenie GOP-u są na ogół wyposażone w pompy wirowe połączone równolegle. W pompowniach objętych systemem sterowania celowym jest sterowanie według wydajności. Z jednej strony umożliwia dopasowanie pracy pomp do żądanego natężenia przepływu, z drugiej strony w przypadku pomp wirowych jest sterowaniem według jednej wielkości zadanej [2] .

Zmianę wydajności pomp można uzyskać poprzez :

- regulację prędkości obrotowej,
- dławienie,
- pracę pomp w reżimie załącz-wyłącz.

Pierwsze dwa z wymienionych sposobów umożliwiają płynną regulację wydajności. Ostatni, polegający na załączaniu i wyłączaniu odpowiedniej liczby pomp, zapewnia skokową regulację. Stosowanie go jest możliwe tylko wówczas, gdy na końcu rurociągu tłoczego znajduje się zbiornik wyrównawczy [3] .

Niezależnie od przyjętego sposobu regulacji wydajności zakres zmian wydajności 1 zespołów pompowych określają następujące punkty :

- punkt przecięcia się charakterystyki przewodu przy otwartym zaworze dławieniowym z charakterystyką przepływu dla obrotów nominalnych,
- punkt przecięcia się prostej o równaniu  $H = H_z$  z charakterystyką przewodu, gdzie  $H_z$  określa wartość ciśnienia w punkcie miarodajnym sieci /rys.1a/.

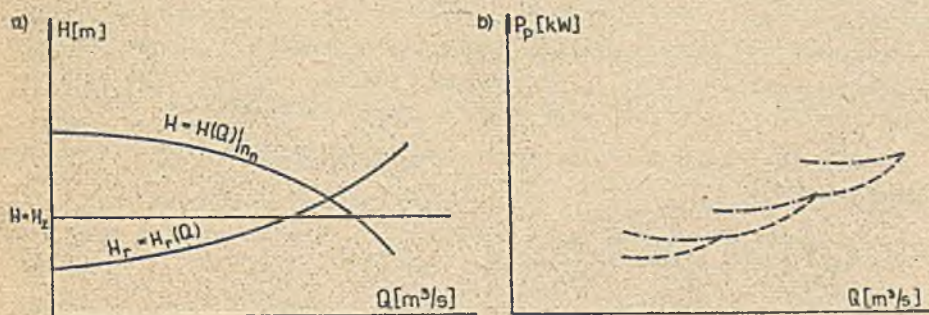
Mając już określony zakres zmian wydajności zespołów pompowych można wyznaczyć zależność energii potrzebnej do przepompowania  $Q$  [ $m^3$ ] wody przez 1 zespół dla regulacji ciśnieniowej lub prędkości obrotowej. Przyczyną nieciągłości jest skokowy wzrost mocy po włączeniu kolejnych zespołów pompowych /rys.1b/ [2] .

Przedstawiony powyżej model matematyczny przepompowni wymaga znajomości następujących charakterystyk :

- przepływu i sprawności dla różnych prędkości obrotowych w przypadku regulacji prędkości obrotowej,
- przepływu i sprawności dla prędkości nominalnej oraz charakterystyki zasowy ciśnieniowej określającej zależność zmian oporu hydraulicznego od stopnia otwarcia w przypadku regulacji ciśnieniowej.

Wszystkie wymienione powyżej charakterystyki różnią się od danych katalogowych. Przyczyną tych różnic jest niedokładny montaż oraz zużycie eksploatacyjne. Oznacza to, że określenie parametrów występujących w modelu wymaga przeprowadzenia identyfikacji eksperymentalnej, przy czym musi ona obejmować pomiary własności obiektu w momencie opracowywania modelu oraz pomiary okresowe po wprowadzeniu sterowania w celu zapewnienia adaptacji modelu do zmieniających się warunków rzeczywistych.

Projekt oprzyrządowania przepompowni dla celów identyfikacji przedstawiono w [10]



- $H = H(Q)/n_n$  - charakterystyka podnoszenia pomp,  
 $H_r = H_r(Q)$  - charakterystyka rurociągu,  
 $n_n$  - obroty nominalne,  
 ————— - moc  $P_p$  dla regulacji prędkości obrotowej,  
 -.-.-.-.- - moc  $P_p$  dla regulacji ciśnieniowej.

Rys.1. Charakterystyki pomp wirowych : a/ podnoszenia, b/ mocy

## 2.2. Model matematyczny procesu uzdatniania wody

Główny ciąg technologiczny rozpatrywanego obiektu zawiera następujące grupy urządzeń :

- pompownię wody surowej,
- zbiornik wstępnego oczyszczania,
- filtry,
- zbiorniki wody czystej,
- pompownię wody czystej.

Urządzeniami współpracującymi z głównym ciągiem produkcji wody są :

- urządzenia przygotowania i dozowania koagulantów,
- pompownia wody płucznej,
- chlorownia.

Ze względu na to, że jako obiekt pilotujący przyjęto stację uzdatniania wody w Kobiernicach, przy opracowaniu modelu wzięto pod uwagę procesy uzdatniania realizowane w tej stacji, tzn. filtrację w filtrach kontaktowych. Pompownie wody surowej, płucznej i czystej są wyposażone w pompy wirowe. Ich model analityczny jest taki sam, jak model pompowni przedstawiony w pkt 2.1.

Proces filtracji jest bardzo złożonym procesem fizyko-chemicznym. Obecnie na świecie jest opracowanych szereg modeli tego procesu. Zasadniczo można wyróżnić dwie grupy modeli : fizykalne oraz chemiczne. Przegląd chemicznych teorii filtracji wykazuje, że istnieją między nimi znaczne niezgodności, co bardzo ogranicza lub wręcz uniemożliwia stosowanie ich do predykcji pracy filtru. Z wymienionych powyżej względów przy opracowywaniu modelu wzięto pod uwagę jedynie model fizykalny.

Równania filtracji w postaci bezwymiarowej można przedstawić w następujący sposób :

$$\frac{1}{\varepsilon - \sigma} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial L} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \lambda \cdot \zeta$$

$$F \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial L} + (\varepsilon - \sigma) \frac{\partial \zeta}{\partial L} = 0,$$

- gdzie :
- $\sigma$  - stopień zanieczyszczenia złoża,
  - $\zeta$  - objęściowe stężenie zawieszin w wodzie filtrowanej,
  - $v$  - przybliżona prędkość filtracji,
  - $L$  - wysokość złoża filtru,
  - $t$  - czas filtracji,
  - $\lambda'$  - współczynnik oporu filtru,
  - $\lambda$  -  $\lambda' \cdot l/v$ ,
  - $\varepsilon$  - porowatość złoża,
  - $\zeta$  -  $C/C_0$ ,
  - $C_0$  - stężenie zawiesziny w wodzie na wlocie filtru,
  - $t$  -  $v/L \cdot t$

$$1 - \frac{1}{L}$$

$$F - \frac{1 - \varepsilon}{C_0} \quad \text{bezwymiarowa stała osadzania dla cyklu filtracyjnego.}$$

Analityczne rozwiązanie równań filtracji celem uzyskania zależności koncentracji zawieszin z głębokością filtru i czasem jest bardzo skomplikowane. Proponowane przez różnych autorów rozwiązania zostały uzyskane po wprowadzeniu określonych aproksymacji. Z tego względu otrzymane przez nich wyniki są przybliżone i zastosowanie ich do sterowania procesem filtracji jest mało przydatne.

Zastosowanie metod numerycznych do rozwiązywania równań filtracji pozwala uzyskać lepszą dokładność, lecz wymaga korzystania z maszyn cyfrowych o dużej pojemności pamięci. Przedstawiony w pracy [4] algorytm numerycznego rozwiązania równań filtracji oparty jest na równaniach różnicowych. W wyniku otrzymuje się wartości  $C$ ,  $\delta$  i  $\partial H / \partial t$  jako funkcje  $t$  i  $z$ , (gdzie:  $\Delta H$  - przyrost strat ciśnienia na złożu od początku cyklu do danej chwili czasu).

Zarówno analityczne, jak i numeryczne rozwiązanie równań filtracji wymaga doświadczalnego wyznaczenia niezbędnych parametrów, tzn. :

- wpływu zmian prędkości filtracji na przebieg strat ciśnienia na złożu,
- wpływu zmian prędkości filtracji na jakość filtratu,
- określenia warunków przepływu przez złoże przy różnych stopniach jego zanieczyszczenia,
- badania szybkości przebiegu klarowania wody po płukaniu filtru.

Badania zostały przeprowadzone na filtrach kontaktowych SUW Kobiernice w trakcie ich eksploatacji [5] .

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić :

- przy niskich i średnich mętnościach wody surowej parametrem określającym czas trwania cyklu filtracyjnego powinny być straty ciśnienia na złożu,
- zależność strat ciśnienia na złożu w funkcji czasu przy stałej prędkości filtracji i nie zmieniającej się jakości wody surowej można aproksymować liniowo,
- w całym zakresie dopuszczalnych prędkości filtracji oraz strat ciśnienia przepływ przez złoże jest laminarny,
- przy określonej zawieszinie oraz danym stopniu zanieczyszczenia złoża istnieje możliwość skrócenia czasu klarowania wody.

Proces koagulacji podobnie, jak proces filtracji jest złożonym procesem fizyko-chemicznym. Jego przebieg zależy przede wszystkim od jakości wody surowej. W praktyce, optymalną wartość dawki koagulantu wyznacza się doświadczalnie.

## 2.3. Modele sieci wodociągowej

### 2.3.1. Model fizyczny

Model fizyczny [6] opisuje zależności pomiędzy zmiennymi stanu pracy obiektów zaopatrzenia w wodę, rozprzyskami w rurociągach, rozbiórami wody przy założeniu ustalonych warunków pracy, przy czym zależności te wynikają z bezpośrednich związków fizycznych między zmiennymi stanu. Zastosowanie modelu fizycznego do sterowania zaopatrzeniem w wodę stwarza następujące problemy :

- a/ formalny, analityczny zapis modelu poszczególnych elementów i całego systemu w postaci dogodnej do odwzorowania w pamięci maszyny cyfrowej i do korzystania z modelu ;
- b/ identyfikacja stałych współczynników modelu ;
- c/ algorytmy rozwiązywania sieci, przy wykorzystaniu modelu fizycznego.

Model fizyczny obejmuje zbiór równań opisujących poszczególne elementy sieci - charakterystyki statyczne gałęzi typu  $\Delta h_i = f(q_i)$ , gdzie  $\Delta h_i$  : różnica ciśnień między węzłem początkowym i końcowym i-tej gałęzi)

- I i II uogólnione prawo Kirchhoffa dla węzłów i oczek sieci,
- charakterystyki zbiorników typu poziom - objętość wody.

Dla sieci zaopatrzenia w wodę, która zawiera  $M$  gałęzi,  $N_1$  węzłów (w tym  $N$  węzłów normalnych,  $N_2$  zbiorników) model fizyczny da się zapisać w postaci macierzowej :

$$\begin{cases} A \times X_1 + B \times X_2 = E \\ B^T \times X_1 = Q + S + H_2 \end{cases}$$

gdzie :  $X_1$  - wektor zmiennych stanu,

$$X_1^T = [q_1, q_2, \dots, q_m],$$

$q_j$  - przepływ w poszczególnych gałęziach sieci,

$E$  - wektor zastępczych sił elektromotorycznych dla charakterystyki gałęzi,

$$E^T = [E_1, E_2, \dots, E_M],$$

$Q$  - wektor zastępczych sił prądomotorycznych reprezentujący odbiorców jednowejściowych,

$S$  - macierz diagonalna współczynników powierzchni zwierciadła wody zbiorników,

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & & & 0 \\ & \dots & & \\ 0 & & & a_k \end{bmatrix} \quad \text{-- macierz diagonalna nieliniowych oporów hydraulicznych dla gałęzi sieci,}$$

$B, B^T$  - macierze opisujące strukturę sieci o elementach 0, -1, 1 ;

$H_z$  - wektor zmian poziomu wody w zbiornikach,

$X_3$  - wektor objętości wody w zbiornikach i ciśnien w węzłach.

Do rozwiązania przedstawionych równań stosuje się najczęściej iteracyjne metody rozwiązywania równań nieliniowych, np.: metoda Newtona, "Finite Element", Cross itd.

W przypadku stosowania modelu fizycznego istotnym problemem jest problem identyfikacji charakterystyk statycznych gałęzi sieci oraz charakterystyk zbiorników. Model fizyczny stosuje się najczęściej dla sieci magistralnych i tranzytowych.

### 2.3.2. Model regresyjny

Model regresyjny znalazł zastosowanie przede wszystkim w sieciach pierścieniowych i rozdzielczych [6]. Szczególnie przydatny okazał się w badaniach symulacyjnych polegających na cyfrowym symulowaniu różnych sterowań na modelu. W tym zastosowaniu ma przewagę nad modelem fizycznym ze względu na wymaganą objętość pamięci maszyny cyfrowej, szybkość obliczeń i cechy adaptacji do zmieniającego się stanu technicznego urządzeń. Model regresyjny sieci opiera się na dwóch równaniach [6] :

$$H = C_1 Q_1^l + C_2 Q_2^l + \dots + C_0 + e_1$$

$$Q = C_1 Q_1^m - C_2 Q_2^m + C_1 H_1 + \dots + C_0 + e_2$$

gdzie :  $Q, H$  - poszukiwany przepływ, ciśnienie,

$Q_j$  - znane przepływy,

$H_j$  - znane ciśnienie,

$C_0, C_1 \dots C_j$  - współczynniki regresji,

$l = 1,85$

$m = 0,542$

$e$  - błąd modelu o charakterze statystycznym .

Ze względu na występowanie wyrazu wolnego  $C_0$  i zmiennych z wykładnikami potęgowymi, oba te równania należą do nieliniowych równań regresji, centrowanych, ale sprowadzalnych do formy liniowej. Mając sformułowane równanie regresji i dostateczną ilość pomiarów wejść i wyjść modelu, współczynniki regresji wyznacza się metodą najmniejszych kwadratów. Tak utworzony model oddaje zarówno zależności fizyczne pomiędzy zmienną

wyjściową a wejściowymi, jak i czysto statystyczne.

Model regresyjny jest modelem jednowyjściowym i trzeba utworzyć ich tyle ile jest wyjść. Zmienna wyjściowa w jednym modelu może być wejściową w drugim. Konieczne jest tu przeprowadzenie analizy w celu określenia minimalnego zliczu zmiennych wejściowych dla danej wielkości wyjściowej tak, aby niedokładność modelu nie przekroczyła granic dopuszczalnych. Informacja o dopuszczalnym błędzie modelu powinna wynikać z analizy dokładności całego systemu.

#### 4. Algorytm optymalnego sterowania pracą obiektów podsystemu zaopatrzenia

##### 4.1. Algorytm sterowania pracą pompowni

Analizując pracę sieci wodociągowej oraz biorąc pod uwagę koncepcję sterowania systemem wodno-gospodarczym można stwierdzić, że z punktu widzenia optymalizacji pracy pompowni istotne jest, jaki obiekt znajduje się na jej wyjściu. Dopiero wyniki uzyskane na drodze optymalizacji określają wydajność, a więc ilość wody, jaką należy dostarczyć do rurociągu ssącego. Stąd też np. napełnianie zbiornika dolnego będzie istotne nie dla samej pompowni, a dla obiektu znajdującego się przed nią (np. dla SUW).

Sterowanie optymalne pompownią ma sens tylko wtedy, gdy istnieje możliwość akumulacji wody pompowanej. W przypadku pompowni sieciowej musi być przepompowane tyle wody, ile zostanie dostarczone do rurociągu ssącego. Optymalizacja jest tu realizowana w procesie projektowania, a nie sterowania. Polega ona na właściwym doborze pomp tak, aby uzyskane ciśnienie tłoczenia nie było za wysokie.

Jako wskaźnik jakości sterowania pompownią proponuje się wskaźnik ekonomiczny [7]. Wynika to z możliwości przeprowadzenia stosunkowo prostej analizy energetycznej pracy pompowni i układu wodociągowego.

Wprowadzenie sterowania optymalnego rozplywem wody w sieci wodociągowej ma przede wszystkim zapewnić taki rozplyw, aby potrzeby wszystkich odbiorców były jak najlepiej zaspokojone. Dodatkowymi elementami są tu; koszt energii potrzebnej na dostarczenie 1 m<sup>3</sup> wody oraz straty poniesione na skutek niedostarczenia wody. O koszcie energii decyduje przede wszystkim koszt energii zużywanej przez pompy. Na wartość strat ekonomicznych poniesionych na skutek niedostarczenia wody ma wpływ wiele czynników zależnych od specyficznych własności odbiorcy.

W oparciu o model matematyczny pompowni, przedstawiony w pkt 2.1, opracowano dwupoziomowy algorytm sterowania [7]. Algorytm ten obejmuje horyzont 24-godzinny. Został on opracowany w oparciu o analizę typowego



układu obiektów w systemie dystrybucji wody. Układ taki składa się z kilku pompowni zasilających zbiornik i równocześnie dostarczających wodę bezpośrednio do odbiorców. Ponieważ taka konfiguracja obiektów powtarza się, więc algorytm został wyprowadzony w sposób ogólny tak, że może on być dalej rozumiany jako algorytm optymalizacji warunkowej funkcji określonego typu. Funkcja kosztów reprezentująca zużycie energii elektrycznej w procesie pompowania  $E(Q)$  (przy zadanym ciśnieniu  $H$ ) określona została w oparciu o analizę charakterystyk zespołów pompowych i rurocią-gów.

Konieczność planowania zmian wydajności pompowni na okres jednej doby jest spowodowana występowaniem "szczytów poborów", w których sumaryczna maksymalna wydajność pompowni jest mniejsza od zapotrzebowania odbiorców. Następuje więc zużywanie nagromadzonego w zbiorniku zapasu wody. Ponieważ wymaga się odtworzenia stanu zapasu wody w zbiorniku na końcu doby, algorytm planowania dobowej pracy pompowni można sprowadzić do wyznaczenia planu napełnień zbiornika uwzględniającego występujące okresy, w których cena energii elektrycznej jest znacznie wyższa od ceny w okresach pozostałych.

Na określenie planu napełnień zbiornika nie mają wpływu pobory użytkowników znajdujących się między pompowniami i zbiornikami, ponieważ mogą oni być zasilani tylko przez pompownie. Wielkość ich poborów wpływa jedynie na wielkość maksymalnego dopływu do zbiornika. Z punktu widzenia zbiornika obojętne jest jaki udział ma każda z pompowni w sumarycznym dopływie. Ponieważ pompy zastosowane w każdej z pompowni są pompami wirowymi, również charakterystyki  $E = E(Q)$  są tego samego typu. W związku z tym możliwe jest na tym etapie rozpatrywanie sumarycznego dopływu do zbiornika. Ograniczenia nakładane na ten sumaryczny dopływ są sumą ograniczeń na dopływy składowe. Ograniczenia wynikające z pracy zbiornika to konieczność utrzymywania minimalnego poziomu wody i nie przekroczenia maksymalnego.

W opracowanym algorytmie [7] na pierwszym poziomie wykorzystuje się liniowe aproksymacje  $E(Q)$ , w wyniku czego otrzymuje się pewne przybliżenie rozwiązania optymalnego dla całego 24-godzinne go horyzontu sterowania. Uzyskane na tym etapie rozwiązanie pozwala na zawężenie przedziałów zmienności odpowiednich zmiennych niezależnych w procesie optymalizacji na drugim poziomie. Należy zwrócić uwagę, że na dokładność przybliżenia rozwiązania optymalnego na pierwszym poziomie ma wpływ nie tylko sposób aproksymacji charakterystyki  $E(Q)$  linią prostą, lecz również postać ograniczeń występujących w problemie. W szczególnie niekorzystnych przypadkach przybliżenie to może być niewystarczające do prawidłowego działania drugiego poziomu optymalizacji. Dlatego też, mimo iż nie wystąpiła taka sytuacja w analizowanych przez nas przypadkach, przewiduje się możliwość powtórzenia optymalizacji na pierwszym poziomie przy zmienionym sposobie aproksymacji wyjściowej funkcji kosztów  $E(Q)$  /np. kilkuośinkowa aproksymacja wypukła/.

Drugi poziom optymalizacji dotyczy również 24-godzinnego horyzontu sterowania. Wykorzystuje się jednak w procesie optymalizacji na tym poziomie rzeczywiste funkcje kosztów w przedziałach określonych przez - znalezione poprzednio - przybliżone rozwiązanie optymalne. Do rozwiązania zagadnienia zastosowano metodę programowania rozdzielnego.

Dwupoziomowa organizacja procesu optymalizacyjnego posiada podwójne uzasadnienie :

- eliminowana jest w ten sposób większość ekstremów lokalnych, co zawsze stanowi zasadniczą trudność w procesie optymalizacji funkcji nieliniowych,
- znacznie zwiększa się efektywność obliczeniowa, wynikająca ze zmniejszenia wymiarowości rozwiązywanych problemów.

#### 4.2. Algorytm sterowania pracą stacji uzdatniania wody

Zagadnienie optymalnego sterowania pracą SUW zostało w pracy [11] przedstawione na przykładzie SUW Kobiernice. Układ sterowania, zgodnie z [1] [8] jest układem trójwarstwowym, zawierającym : warstwę adaptacji, optymalizacji i sterowania bezpośredniego.

W warstwie adaptacji realizowane są następujące zadania :

1. Wyznaczenie maksymalnej średniej prędkości filtracji  $v_D$ , a stąd średniej wydajności filtra  $Q_D$  ;
2. Wyznaczenie optymalnej długości filtrocylu  $t_f$  ;
3. Wyznaczenie czasu płukania filtra  $t_p$  ;
4. Wyznaczenie optymalnych dawek reagentów ;
5. Aktualizacja charakterystyk pomp i rurowciągów.

Zadaniem warstwy optymalizacji jest minimalizacja dobowego kosztu energii elektrycznej zużywanej w procesach pompowania wody : surowej, czystej i płucznej. Na podstawie wartości okresowych poborów wody przez poszczególnych odbiorców w ciągu doby oraz wartości parametrów wyznaczonych przez warstwę adaptacji przyjmuje się następujące wartości zadane dla warstwy optymalizacji :

1. Maksymalne czasy pracy filtrów w danej dobie, tj. najpóźniejsze dopuszczalne terminy ich płukania ; czasy te wyznaczone są na podstawie znajomości terminów poprzednich płukań każdego z filtrów oraz długości filtrocylu. Określona zostaje tym samym liczba filtrów  $n_p$ , które powinny zostać wypłukane w ciągu rozpatrywanej doby.
2. Objętość wody  $V_p$  oraz energia  $E_p$  zużywana do wypłukania jednego filtra.
3. Minimalna liczba filtrów, które powinny pracować w ciągu rozpatrywanej doby

$$n_j = \frac{\sum_{k=1}^1 Q_{ok} + n_p \cdot V_p + t_p \cdot Q_D \cdot n_p}{Q_D},$$

przy czym  $Q_{ok}$  stanowi wartość sumarycznego poboru wody przez odbiorców w okresie  $k$ -tym, gdzie  $k = 24/1$  [godz].

Z powyższych rozważań wynika, że zarówno w warstwie adaptacji, jak i optymalizacji realizowane jest zadanie minimalizacji zmiennego kosztu pracy SUW przy określonych ograniczeniach. Korzyść z wprowadzenia oddzielnej warstwy adaptacji polega w rozpatrywanym przypadku na możliwości przedstawienia modelu obiektu w postaci znacznie ułatwiającej przeprowadzenie bieżącej optymalizacji. Horyzont optymalizacji dla zadań warstwy adaptacji jest dłuższy niż dla zadań warstwy optymalizacji.

Zagadnienie wyznaczania optymalnych dobowych harmonogramów w pracy SUW można przedstawić jako minimalizację wskaźnika jakości określonego przez dobowy koszt energii elektrycznej zużywanej w procesie pompowania wody w SUW [8]. Podobnie, jak w przypadku pompowni, minimalizowana funkcja jest funkcją nieliniową i nieciągłą. Zagadnienie optymalizacji zostało rozwiązane również dwuetapowo w oparciu o metodę programowania rozdzielnego.

W wyniku optymalizacji otrzymuje się optymalne harmonogramy :

- wydajności pompowni wody surowej,
- wydajności pompowni wody czystej,
- płukanki filtrów.

##### 5. Badania symulacyjne modelu fizykalnego sieci dystrybucji wody

Jednym z celów, dla którego opracowano model fizykalny sieci zaopatrzenia w wodę, jest modelowanie pracy i sterowanie siecią w pewnym horyzoncie czasu  $T$ , np. doby czy tygodnia.

W pracy [9] przedstawiono program symulacji dla sieci zaopatrzenia w wodę, bazujący na modelu fizykalnym opisanym w pkt 2.3. W programie oblicza się i drukuje przebiegi czasowe ciśnień w węzłach sieci, poziomów w zbiornikach i przepływów we wszystkich gałęziach sieci. Badane są i sygnalizowane przekroczenia ograniczeń ciśnienia wody w węzłach a także deficyty i przelewy wody w zbiornikach.

Badana sieć może zawierać wszystkie podstawowe elementy występujące w rzeczywistych systemach zaopatrzenia w wodę, jak : rurociągi, opory miejscowe, pompy o zadanych charakterystykach lub wydajnościach i zbiorniki.

Graf, będący odpowiednikiem sieci, w którym węzły sieci odpowiadają węzłom grafu, zaś gałęzie sieci gałęziom łączącym grafu, powinien być

grafem spójnym. Innymi słowy, w grafie sieci nie mogą występować grupy węzłów izolowane. Zakłada się, że odbiorcy sieci są skupieni w węzłach sieci. Przez cały okres symulacji pozostają stałe tylko: struktura sieci, poziomy geodezyjne węzłów i dane o zbiornikach. Pozostałe wielkości mogą być zmiennie w czasie.

W danych do programu podaje się:

- odpowiednio zakodowany schemat sieci,
- parametry elementów sieci potrzebne do zbudowania modelu fizycznego (np. długości rurociągów itp.),
- początkowe poziomy wody w zbiornikach,
- przebiegi czasowe poborów wody przez odbiorców w zadanym okresie symulacji,
- przebiegi czasowe sterowań w postaci: przepływów dla pomp o zadanej wydajności, charakterystyk dla pozostałych rodzajów pomp, położenia klap, zaworów itp.

Okres symulacji  $T$  składa się z zadanej ilości dostatecznie małych odcinków czasu  $\Delta t$ , w których można założyć stan ustalony sieci (tj. stałość przepływów, ciśnień, poziomów w zbiornikach, poborów). Każdemu z takich odcinków czasu odpowiada jeden etap obliczeń, w którym rozwiązuje się sieć w stanie ustalonym. Przy rozwiązywaniu sieci dla stanu ustalonego zastosowano metodę iteracyjną, bazującą na aproksymacji charakterystyk nieliniowych oporów hydraulicznych po siecznej. Dla metody tej zyskano stosunkowo krótki czas obliczeń w porównaniu z innymi badanymi metodami. Czas obliczeń jest tu istotny, ponieważ w całym okresie symulacji obliczenia hydrauliczne sieci są powtarzane wielokrotnie. Opracowany program sprawdzono na dwóch przykładach, których wyniki przedstawiono w [3].

## 6. Podsumowanie

Omówione w poprzednich punktach prace wykonane przez Instytut Automatyki w ramach PR-7.05 dotyczyły następujących zagadnień:

- modeli matematycznych obiektów technologicznych dla celów sterowania,
- algorytmów sterowania obiektami technologicznymi,
- badań symulacyjnych modeli sieci.

Zakres przedstawionych prac dotyczy przede wszystkim pojedynczych obiektów lub niewielkich fragmentów sieci obejmujących kilka obiektów. Zastosowany wskaźnik jakości sterowania określający koszt zużytej energii jest funkcją nieliniową. Przyjęcie harmonogramów godzinowych pracy powoduje, że już dla pojedynczych obiektów wymiar rozwiązywanego zadania jest duży. Stąd też rozszerzenie optymalizacji na większe fragmenty sieci będzie wymagało dekompozycji wskaźnika jakości.

Stopień wyczerpania przedstawionych zagadnień umożliwia sprawdzenie na drodze symulacji działania algorytmów sterowania oraz określenia efektów uzyskanych poprzez ich wprowadzenie. Dalszy etap prac winien obejmować :

- sprawdzenie sterowania na obiektach pilotujących,
- opracowanie algorytmów sterowania dla całej sieci wodociągu WPWiK.

Wdrożenie sterowania na obiektach pilotujących jest niezbędne dla dalszego rozwoju i weryfikacji opracowanych algorytmów. Jego realizacja jest jednak uwarunkowana dwoma czynnikami :

- wyrażeniem zgody przez WPWiK Katowice,
- oprzyrządowaniem obiektów w niezbędną aparaturę pomiarową. Projekty takiego oprzyrządowania zostały przez Instytut wykonane [10].

W miarę realizacji inwestycji dotyczących rozbudowy, modernizacji i automatyzacji sieci wodociągowej WPWiK opracowane algorytmy sterowania będą mogły być wdrażane. Nie oznacza to jednak zakończenia prac nad optymalnym sterowaniem, ponieważ należy się liczyć z koniecznością weryfikacji algorytmów na skutek różnic pomiędzy rzeczywistym a przyjętym modelem matematycznym. Różnice takie zawsze istnieją, ponieważ a priori nie jesteśmy w stanie w pełni ocenić jakościowego i ilościowego przebiegu poszczególnych zjawisk fizycznych. Ponadto, postać przyjętego wskaźnika jakości również nie jest na ogół postacią ostateczną i wymaga modyfikacji.

Rozwój prac nad modelami matematycznymi i algorytmami sterowania będzie prowadzony w następujących kierunkach :

- opracowanie algorytmów sterowania zaopatrzeniem w stanach awaryjnych i deficytu wody,
- zasady koordynacji sterowania systemem wodno-gospodarczym z innymi systemami funkcjonującymi na obszarze systemu,
- opracowanie modeli i algorytmów sterowania dla obiektów nietypowych.

Ostatni z wymienionych kierunków dotyczy przede wszystkim SUW o innych rozwiązaniach technologicznych niż filtry kontaktowe. Pierwsze dwa obejmują rozszerzenie dotychczas opracowanych modeli i algorytmów sterowania na całą sieć wodociągową, przy założeniu częściowego zaspokojenia odbiorców oraz stanu awaryjnego wybranych obiektów.

## 6. LITERATURA

- [1] Koncepcja kompleksowego sterowania w systemie wodno-gospodarczym na obszarze Śląska. Praca NB-502. Instytut Automatyki Przemysłowej i Pomiarów Politechniki Śląskiej. Gliwice 1976, (niepublikowane).
- [2] U. POCIASK - Ocena sposobów regulacji wydajności pomp na przykładzie przepompowni. Zesz.Nauk. Politechniki Śląskiej, Automatyka 2. 52, 1980.
- [3] U. POCIASK - Wybór rozwiązań układu sterowania przepompownią. Zesz.Nauk.Pol. Śl., Automatyka. 2. 48, 1979.
- [4] J.SZEBESZCZYK - Model matematyczny procesu filtracji w filtrach kontaktowych. Zesz.Nauk.Pol.Śl., Automatyka, 2. 52, 1980.
- [5] J.SZEBESZCZYK - Harmonogramowanie procesu produkcji wody w stacji uzdatniania z filtrami kontaktowymi. Zesz.Nauk.Pol.Śl.,Automatyka z55, 1980.
- [6] J.ŻELEZIK, L.LISAK - Sformułowanie modelu fizykalnego i wybór badań modelowych. Praca NB-170/RAu1/76, Politechnika Śl., Gliwice (niepublikowane).
- [7] A.BARGIEŁA, U. POCIASK - Optimization of the work of the chosen hydraulic objects set. Materiały konferencyjne "Systems analysis and simulation" - Berlin 1980.
- [8] J.SZEBESZCZYK - Możliwości operatywnego sterowania pracą stacji uzdatniania wody. (Niniejszy zeszyt)
- [9] J.ŻELEZIK - Algorytm symulacji sieci zaopatrzenia w wodę przy wykorzystaniu modelu fizykalnego. (Niniejszy zeszyt)
- [10] U. POCIASK - Metodyka identyfikacji układu : pompownia-rurociąg-zbiornik na przykładzie wybranych obiektów WPWiK. Praca NB-170/RAu1/76, Instytut Automatyki Pol.Śl., Gliwice 1979.

ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМОЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ВОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ПО ПРАВИТЕЛЬСТВЕННОЙ ПРОГРАММЕ PR-7.05.

Резюме :

В докладе представлено работы по управлению подсистемой водоснабжения водно-хозяйственной системы выполненные в Институте автоматизации. Работы эти касаются математических моделей и алгоритмов оптимального управления отдельными объектами а также водопроводной системы включающей несколько объектов. Оптимальное управление базируется на показателе качества определенного стоимостью электрической энергии.

POSSIBILITIES OF THE CONTROL OF THE WATER SUPPLY SUBSYSTEM IN THE WATER ECONOMIC SYSTEM /a.t. PR-7.05/

Abstract

Reports dwelling with the problem of the control of the water supply subsystem in the water economic system which were worked out in the Institute of Automatic Control are being discussed in the paper. In this reports both mathematical models and algorithms of optimum control of separate objects and hydrological objects set are taken into account. The optimum control scheme base on the minimization of the costs of the electric energy.