

KAZIMIERZ A. SALEWICZ  
TOMASZ TERLIKOWSKI  
INSTYTUT METEOROLOGII  
I GOSPODARKI WODNEJ

## UKŁAD STEROWANIA ROZDZIAŁEM WODY NA BIEŻĄCO W SYSTEMIE WIELOZBIORNIKOWYM

### Streszczenie

Omówiona jest koncepcja wielowarstwowego układu sterowania, który dokonuje rozdziału zasobów wodnych w systemie wodno-gospodarczym. Szczególna uwaga poświęcona jest warstwie sterowania bezpośredniego, a w niej - problematyce bieżącego sterowania retencją zbiorników. Po dokładnym opisie proponowanego sposobu działania tej warstwy zaprezentowane są przykładowe wyniki symulacji sterowania w systemie wodnym GOP.

### 1. Wprowadzenie

W pracy przedstawiona zostanie metoda sterowania systemem wodno-gospodarczym przy zastosowaniu mechanizmu cenowego i korekcji cen omawianych obszernie w pracach [4], [5]. Ponadto opisane zostaną wyniki obliczeń symulacyjnych sterowania wg omawianej metody systemem wodno-gospodarczym GOP (patrz [3], [2]), którego model przedstawiony był wraz z koncepcją sposobu sterowania w pracy [1].

Ze względu na przejrzystość prezentowanych rezultatów przytoczymy tu najbardziej istotne cechy omawianego modelu:

- w skład rozpatrywanego systemu wchodzi zbiorniki Goczałkowice, Tresna i Porąbka łącznie z Czajcem oraz rzeki Górna Wisła, Soła i Przemsa;
- użytkownikami wody w systemie są aglomeracje miejsko-przemysłowe Bielska-Białej i Katowic, Zakłady Chemiczne Oświęcim, huta "Katowice", pobierająca wodę za pośrednictwem zbiornika w Dzieńkówicach oraz Spółka Rybacka w Kątach;
- zadanie sterowania w systemie sprowadza się do realizacji trzech podstawowych celów:
  - 1) zaspokajania ilościowych zapotrzebowań użytkowników na wodę;

- 2) utrzymywania możliwie wysokiej /tzn. bliskiej pożądanym wartościom granicznych stężeń/ jakości wody w rzece Wiśle dla profilu Dwory;
- 3) utrzymywania /odpowiedniego ze względu na wymagania długoterminowej pracy zbiorników/ przebiegu trajektorii zmiennych stanu zbiorników w pobliżu trajektorii pożądaných  $\hat{w}$ ;

- jako zmienne decyzyjne przyjęto wielkości przerzutów wody do poszcze-  
gólnych zagregowanych odbiorców oraz odpływy ze zbiorników oznaczane  
odpowiednio przez  $m$  oraz  $u$ .

Czynności układu sterowania systemem wodno-gospodarczym można podzielić -  
ze względu na rodzaj podejmowanych decyzji i horyzont czasowy, jakiego te  
decyzje dotyczą, na trzy warstwy [3]:

- A - warstwę planowania długoterminowego retencji zbiorników,
- B - warstwę planowania średnioterminowego retencji,
- C - warstwę sterowania bieżącego.

W przypadku opisywanego tu eksperymentu numerycznego symulacji stero-  
wania czynności warstwy A układu sterowania nie były rozpatrywane, po-  
sługiwaliśmy się jedynie wyznaczonymi wcześniej trajektoriami pożądanymi  
 $\hat{w}$ , które formalnie rzecz biorąc - określane są właśnie przez warstwę A.  
W naszych badaniach koncentrowaliśmy się faktycznie na zbudowaniu mecha-  
nizmu warstwy C sterowania bieżącego, natomiast rozwiązywanie zadania pla-  
nowania retencji na średnim horyzoncie czasowym /czynności warstwy B /  
tworzyło podstawy do stawiania zadania dla warstwy C oraz analizy wykony-  
wanych w tej warstwie czynności

## 2. Warstwa sterowania bieżącego - ostateczna postać algorytmu korekcji cen

Warstwa sterowania bieżącego spełnia w naszym układzie sterowania dwie  
podstawowe funkcje:

- steruje retencją zbiorników na krótki horyzont czasu;
- dokonuje racjonalnego rozdziału zasobów wodnych, określonych na podsta-  
wie planu retencji na krótki horyzont.

Zadanie to jest trudne, dosyć "nieokreślone" i dotąd nie posiada popraw-  
nego teoretycznie, nie budzącego wątpliwości rozwiązania. W naszej pracy  
przyjęliśmy następujący sposób postępowania: modyfikowaliśmy regułę decy-  
zyjną, odpowiedzialną za sterowanie retencją, na podstawie wyników prób  
symulacyjnych, kierując się przy tym często intuicyjnymi, ale nie sprzecz-  
nymi logicznie przesłankami ogólnymi. Poniżej opiszemy szczegółowo, jak  
wygląda algorytm działania warstwy sterowania bieżącego w obecnej postaci,  
po wykonaniu wielu już symulacji. Algorytm ten ma formę złożonego nieli-  
niowego sprzężenia od stanu systemu w  $(t)$ .

Warstwę sterowania bieżącego będziemy nazywać warstwą C. Ma ona budowę  
dwupoziomą. Składa się z jednostki centralnej, zwanej koordynatorem i  
z wielu jednostek lokalnych. Koordynator ma na celu sterowanie retencją,  
której plan  $\hat{w}$  wyznaczony został poprzez rozwiązanie zadania planowania  
retencji na średnim horyzoncie czasowym (patrz [1], [3]). Sterowanie  
retencją odbywa się za pośrednictwem cen  $p$  dobieranych przez koordynatora

i zadawanych jednostkom lokalnym w celu spowodowania racjonalnego biegu - tego rozdziału zasobów.

Z kolei jednostki lokalne mają za zadanie wyznaczyć bezpośrednie decyzje /pobory i przerzuty wody/ dla swoich podsystemów. Respektowanie cen, zadanych przez koordynatora, zapewnia przy tym, że rozdział zasobów wodnych /określonych przez politykę retencji koordynatora/, wynikający z decyzji jednostek lokalnych, jest racjonalny, "sprawiedliwy". Ważne jest, że każda jednostka lokalna podejmuje swoje decyzje oddzielnie, niezależnie od pozostałych. Pozwala to na decentralizację procesu podejmowania decyzji oraz decentralizację informacji o podsystemach.

Podstawowy schemat działania warstwy C jest następujący: w chwili interwencji  $t_{j-1}$ , na podstawie pomiaru stanu rzeczywistego  $w^r(t_{j-1})$  koordynator określa cenę  $\bar{p}_j$ , obowiązującą jednostki lokalne w  $[t_{j-1}, t_j]$ . Oznaczmy przez  $W_j(p)$  wartość stanu zbiorników, przewidywaną w warstwie C na chwilę  $t_j$  - dla ceny  $p$ . Koordynator określa tę wielkość na podstawie wartości  $w^r(t_{j-1})$ , prognoz krótkoterminowych na horyzont  $[t_{j-1}, t_j]$  i modelu decyzyjnego jednostek lokalnych - zgodnie z równaniem stanu

$$W_j(p) = w^r(t_{j-1}) + \sum_{i=1}^N g_i^j(p) + \tilde{z}_d^j \quad (1)$$

gdzie:  $g_i^j(\cdot)$  opisuje wpływ ceny  $p$  na zmianę stanu zbiorników w czasie  $[t_{j-1}, t_j]$ , spowodowaną podjęciem decyzji bezpośrednich przez  $i$ -tą jednostkę lokalną - (odpowiadających cenie  $p$ )

$\tilde{z}_d^j$  oznacza prognozy dopływów zewnętrznych w czasie  $[t_{j-1}, t_j]$ .

Na podstawie takiego zagregowanego modelu  $W_j(p)$  określona jest funkcja

$$G_j(p) = W_j(p) - \bar{w}(t_j) \quad (2)$$

$\bar{w}(t_j)$  jest wartością pożądaną stanu w chwili  $t_j$ , zaś  $G_j(\cdot)$  opisuje wpływ ceny  $p$  na odchylenie stanu przewidywanego od wartości pożądanej.

Koordynator posługuje się modelem  $G_j(\cdot)$  przy określaniu ceny  $\bar{p}_j$ . W tym celu używa pewnego algorytmu. Przyjęliśmy, że algorytm ten ma postać:

$$p_j^{k+1} = p_j^k - E \cdot G_j(p_j^k), \quad k = 0, 1, \dots, n_0 \quad (3)$$

$$p_j^0 = \hat{p}_j, \quad p_j^{n_0} = \bar{p}_j$$

gdzie  $\hat{p}_j$  jest ceną koordynującą dla modelu systemu i jednostek lokalnych, używanego w warstwie B /przy optymalizacji na średni horyzont/ - i dla trajektorii stanu  $\hat{w}(\cdot)$ , czyli dla planu retencji wyznaczonego przez tę warstwę; natomiast  $E$  jest macierzą.

Sprawie doboru postaci algorytmu (3) poświęcone były ostatnie badania symulacyjne. Miały one pomóc w ustaleniu rozsądnej polityki retencji prowadzonej przez jednostkę centralną warstwy C /koordynator/.

Tak więc rozważenia sprowadzamy do problemu, według jakiego algorytmu, biorąc pod uwagę różniące się jakimi przesłankami w różnych sytuacjach, dobiera się politykę. Jeśli przyjęliśmy już algorytm w postaci (3), to równoważnym pytaniem jest: jakie parametry ma mieć algorytm (3), a w szczególności:

a/ jak określić funkcję  $G_j(\cdot)$  /stan pożądany/!

b/ jak dobrać macierz korekcji E i liczbę  $n_0$  /ilość iteracji/ i rytmu/!

c/ jak często dokonywać interwencji - korekcji cen!

Jasne jest, że odpowiedzi na te pytania określa nam polityka retencyjnej warstwy C, czyli sposób sterowania retencją przez warstwę C. Schemat bieżącego sterowania retencją jest następujący:

Przedewszystkim wyodrębniła się dwa różne schematy /tzw. reżimy sterowania:

I - w sytuacji normalnej, gdy nie grozi przepełnienie zbiorników - przy normalnym tok dużych dopływów,

II - w sytuacji przeciwnej, czyli w warunkach powodzi.

Reżim II jest nadrzędny w stosunku do I. Dokładniej: układ sterowania określa swe decyzje według schematu I, ale w sytuacji powodzi - gdy przepełnienie któregoś ze zbiorników - nie realizuje tych decyzji, określa inne, posługując się schematem II i te dopiero są realizowane. Najistotniejszą różnicą między tymi schematami jest to, że układ w reżimie II interweniuje częściej. W naszym modelu przyjęliśmy, że w I - interweniuje co tydzień, zaś w II - co dzień. Taka sama jest też długość horyzontów czasu, na które układ planuje swe decyzje w reżimach I i II.

### I. Sterowanie w warunkach normalnych

Założmy, że współrzędne wektora  $w$  i wektora cen  $p$  są uporządkowane następująco:

$$w = (w_T, w_G, w_P)$$

$$p = (p_T, p_G, p_P)$$

Znając wartość rzeczywistą stanu  $w^r(t_{j-1})$  w chwili początkowej, posługując się prognozą dopływu na okres  $[t_{j-1}, t_j]$ , oraz dysponując trajektoriami odniesienia  $\bar{w}$  i planowaną  $\hat{w}$  z warstwy wyższej, dynator musi zdecydować, jaki stan  $\bar{w}(t_j)$  chce osiągnąć w chwili  $t_j$ . Odnośnie algorytmu (3) pytanie to brzmi: co opisywać będzie funkcja  $G_j(\cdot)$ , czyli w stosunku do czego oceniać się będzie odchylenie trajektorii - co uznamy za bieżącą trajektorie odniesienia  $\bar{w}$ , oraz - jak nie będzie się "nagimnąć" trajektorię  $\hat{w}$  w do trajektorii odniesienia  $\bar{w}$ . To drugie - znajduje wyraz w wartościach współczynników macierzy E i w ilości iteracji algorytmu.

1. Bieżącą trajektorię odniesienia  $\bar{w}$ , w ściślejszej - jej wartości w chwili  $t_j$ :  $\bar{w}(t_j)$  - przyjmuje się jako  $\hat{w}(t_j)$  lub  $\tilde{w}(t_j)$ , w zależności od położenia punktu  $W_j(\hat{p}_j)$  względem  $\tilde{w}(t_j)$  - dla każdej współrzędnej stanu /każdego zbiornika/ osobno:

- jeśli  $W_j(\hat{p}_j)$  leży po tej samej stronie  $\tilde{w}(t_j)$ , co  $\hat{w}(t_j)$ , czyli

$$(W_j(\hat{p}_j) - \tilde{w}(t_j)) \cdot (\hat{w}(t_j) - \tilde{w}(t_j)) \geq 0,$$

$$\text{to: } \bar{w}(t_j) = \hat{w}(t_j), \quad (4)$$

$$\text{w przeciwnym przypadku: } \bar{w}(t_j) = \tilde{w}(t_j). \quad (5)$$

Przypomnijmy, że  $W_j(\hat{p}_j)$  oznacza stan przewidywany na koniec okresu  $[t_{j-1}, t_j]$  dla ceny  $\hat{p}_j$  - optymalnej przy średnioterminowym planie retencji  $\hat{w}$ ; wielkość ta zależy od  $w^r(t_{j-1})$ .

Powyższa zasada wyboru punktu odniesienia  $\bar{w}(t_j)$  wynika z koncepcji warstwy C, jako poprawiającej jakość sterowania retencją. Ma to uzasadnienie w ogólnym spostrzeżeniu, że kierunek odchylenia trajektorii rzeczywistej od każdej trajektorii planowanej optymalnie, jest zgodny z kierunkiem odchylenia trajektorii ściśle optymalnej.

2. Po ustaleniu postaci funkcji  $G_j(\cdot)$  koordynator wykonuje, określoną dalej, liczbę iteracji (3) z macierzą E dobraną następująco:

- przyjmuje się macierz podstawową o postaci diagonalnej

$$E = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Jest ona stosowana w iteracji  $k - t_{e_j}$ , jeśli

$$G_j(p_j^{k-1}) < 0,$$

czyli jeśli w każdym zbiorniku przewidywany jest deficyt bilansu wody /w stosunku do wartości pożądanej  $\bar{w}(t_j)$  /,

- w przeciwnym przypadku zmienia się odpowiednio współczynniki na diagonalni:

jeśli  $G^T \geq 0$  /współrzędna wektora  $G_j(p_j^{k-1})$  dla zbiornika Tresna/,  
to  $E_{1,1} = 5 \cdot 10^{-6}$

- jeśli  $G^G \geq 0$  /dla zbiornika Goczałkowice/, to  $E_{2,2} = 10^{-5}$

- jeśli  $G^P \geq 0$  /dla zbiornika Porąbka/, to  $E_{3,3} = 5 \cdot 10^{-6}$ .

Wartości współczynników macierzy E zostały oszacowane teoretycznie, a następnie dobrane szczegółowo na podstawie licznych prób obliczeniowych. Powyższa zasada - łagodniejszej interwencji w sytuacji nadmiaru wody niż w przypadku deficytu, - wynika z ogólnej cechy problemu sterowania; poza warunkami powodziowymi celem sterowania retencją jest zabezpieczenie systemu przed deficytem w przyszłości.

3. Algorytm (3) z parametrami określonymi według powyższych zasad 1,2 wykonuje pewną ilość iteracji, uzyskując "wstępną propozycję" ceny  $\bar{p}_j$ .  
Konkretnie, wykonuje się 5 iteracji lub mniej, jeśli stopień

zwężenia osiągnął wartość nie większą od 0,4 tzn:

$$|g_j(\bar{p}_j)| \leq 0,4 \cdot |g_j(\hat{p}_j)| \quad (7)$$

Przyjęcie takich wartości zapewnia "łagodne" działanie algorytmu korekcji. Jest to przejawem dążenia, by warstwa sterowania bieżącego nie trzymała się zbyt sztywno ustalonego wcześniej planu retencji. Zawsze bowiem trzeba pamiętać, że ten plan jest oparty na prognozach długoterminowych i wobec tego odbiega od planu rzeczywiście optymalnego.

Po tym etapie wstępnym sprawdza się położenie "osiągniętego" stanu  $W_j(\bar{p}_j)$  względem ograniczeń na każdą współrzędną stanu. Wprowadza się tzw. ograniczenia zapasowe  $w'_{\min}$ ,  $w'_{\max}$ , ostrzejsze od ograniczeń wyjściowych, tzn:

$$w_{\min} \leq w'_{\min} \qquad w'_{\max} \leq w_{\max}$$

Wstępne ograniczenia zapasowe mają następujące wartości /w mln. m<sup>3</sup>/:

- dla zbiornika Goczałkowice

$$20 = w_{G\min} < w'_{G\min} = 30 < 120 = w'_{G\max} < w_{G\max} = 135 \quad (8)$$

- dla zbiornika Tresna

$$15 = w_{T\min} < w'_{T\min} = 20 < 90 = w'_{T\max} < w_{T\max} = 100$$

- dla zbiornika Porąbka-Czaniec

$$8 = w_{P\min} = w'_{P\min} < w'_{P\max} = w_{P\max} = 29,7$$

/W przypadku, gdy współrzędne stanu  $\bar{w}(t_j)$  - bieżącej trajektorii odniesienia - leżą blisko ograniczeń, ograniczenia zapasowe modyfikuje się dodatkowo, ale ten szczegół pominiemy już w opisie/.

4. Jeśli dla każdego zbiornika zachodzi warunek:

$$w'_{\min} \leq W_j(\bar{p}_j) \leq w'_{\max} \quad (9)$$

czyli przewidywany stan na koniec tygodnia mieści się w obszarze ograniczeń zapasowych, to cena  $\bar{p}_j$  jest przyjęta jako decyzja do realizacji. Na podstawie tej ceny rozpoczyna się sterowanie, które trwa aż do końca tygodnia /lub wcześniej jest zmieniona w reżimie II, jeśli zaistnieje podczas tego tygodnia niebezpieczeństwo przepełnienia zbiorników - stan powodziowy/.

5. W przeciwnym przypadku, gdy  $W_j(\bar{p}_j) \notin [w'_{\min}, w'_{\max}]$  dla któregoś ze zbiorników, wykonuje się dodatkowe iteracje algorytmu według następujących zasad szczegółowych:

Przyjmuje się macierz wyjściową  $E = 0$  i uzupełnia odpowiednimi współczynnikami w zależności od stanu i liczby wykonywanych iteracji.

5a/ do 50 maksymalnie numeru iteracji algorytmu:

$$- \text{jeśli } W_j^T(p_j^k) \notin [w'_{T\min}, w'_{T\max}], \text{ to } E_{1,1} = 2 \cdot 10^{-5}$$

$$- \text{jeśli } W_j^G(p_j^k) \notin [w'_{G\min}, w'_{G\max}], \text{ to } E_{2,2} = 10^{-4}$$

- jeśli  $w_j^P(p_j^k) \notin [w_{Tmin}^P, w_{Tmax}^P]$  i  $W^P(p_j^k) \notin [w_{Pmin}^P, w_{Pmax}^P]$ ,

to:  $E_{1,3} = 5 \cdot 10^{-6}$ ,  $E_{3,3} = 10^{-5}$ .

Z tak określoną macierzą E wykonuje się jedną iterację algorytmu (3), po czym:

- pozostawia się wstępne ograniczenia zapasowe, dopóki numer iteracji algorytmu nie przekracza 10;
- dla większych numerów iteracji ograniczenia zapasowe pokrywają się z ograniczeniami rzeczywistymi.

Po wykonaniu iteracji sprawdza się, czy są spełnione aktualne ograniczenia zapasowe. Jeśli tak, to proces korekcji wg schematu I kończy się, jeśli nie wykonuje się następną iterację.

5b/ Gdy numer iteracji przekracza 50, algorytm "rezygnuje" ze spełnienia ograniczeń w większych zbiornikach G, T i dokonuje kilku następných iteracji, aż do spełnienia ograniczeń w zbiorniku P.

Macierz korekcji ma teraz tylko jeden współczynnik niezerowy:

$$E_{3,3} = 2,5 \cdot 10^{-5},$$

czyli zmienia się tylko cena  $p_P$ , związana ze zbiornikiem P. Ponadto, modyfikuje się trajektorię odniesienia i wartości ograniczeń dla zbiornika P, mianowicie:

- jeśli  $W_j^P(p_j^k) \gg w_{Pmax}^P$ , to:

$$\bar{w}_P(t_j) = w_{Pmax}^P, \quad w_{Pmax}^P = w_{Pmax}^P + 0,1 \quad (10)$$

- jeśli  $W_j^P(p_j^k) \leq w_{Pmin}^P$ , to:

$$\bar{w}_P(t_j) = w_{Pmin}^P, \quad w_{Pmin}^P = w_{Pmin}^P - 0,1 \quad (11)$$

Powyższe reguły określają zasady sterowania retencją w reżimie I.

## II. Sterowanie w warunkach powodzi

Sterowania bezpośrednie m, u, określone na podstawie ceny  $\bar{p}_j$ , wyznaczonej według schematu I, realizuje się w systemie rzeczywistym, kontrolując na bieżąco stan zbiorników. Jeśli grozi przekroczenie górnego ograniczenia  $w_{max}$  w którymkolwiek ze zbiorników w ciągu najbliższego dnia, to zmienia się decyzje centralne /ceny/, przechodzą na reżim II. Ceny są teraz zmieniane co i dzień. Także co i dzień dokonuje się pomiaru stanu  $w^T$ , zaś w modelu decyzyjnym układu sterowania uwzględnia się aktualne, krótkoterminowe prognozy na okres i dnia. Przyjmujemy uzasadnione założenie, że są to znacznie dokładniejsze prognozy od tygodniowych  $\bar{d}$ .

Zmiana cen na najbliższy dzień dokonywana jest według algorytmu (3), podobnie jak w schemacie I przy przekraczaniu ograniczeń zapasowych /pkt. 5/. Przy tym, jako cenę startową  $p_j^0$  przyjmuje się teraz cenę  $\bar{p}_j$ , wyznaczaną na ten tydzień według reżimu I.

Ponadto zmianie /w stosunku do pktu 5/ ulegają następujące parametry algorytmu:

1. Trajektorią odniesienia w reżimie II staje się

$$\bar{w}(t_j) = w_{\max},$$

czyli plan retencji polega teraz jedynie na tym, by zbliżyć stan zbiornika zagrożonego przepełnieniem do górnego stanu dopuszczalnego.

/Zaznaczamy, że  $t_{j-1}$ ,  $t_j$  oznaczają obecnie początek i koniec horyzontu czasu dla reżimu II, a więc początek i koniec ustalonego dnia, a nie tygodnia jak w I/.

2. Ograniczenia zapasowe są przesunięte w górę w stosunku do górnych ograniczeń rzeczywistych  $w_{\max}$ , co jest fizycznie dopuszczalne dzięki istnieniu rezerwy. Zakładamy bowiem, że współrzędne wektora  $w_{\max}$  są jeszcze w pewnym stopniu ograniczeniami "pojęciowymi", a nie dokładnie, fizycznie maksymalnymi pojemnościami poszczególnych zbiorników. Przyjmujemy następujące wartości:

$$w_{G\max}^* = w_{G\max} + 0,5$$

$$w_{T\max}^* = w_{T\max} + 0,5$$

$$w_{P\max}^* = w_{P\max}$$

3. Zasady doboru macierzy  $E$  są następujące:

Startując z macierzy zerowej  $E=0$ , uzupełnimy ją odpowiednimi współczynnikami w zależności od stanu przewidywanego na koniec dnia i od numeru iteracji algorytmu /numerację rozpoczynamy od początku, od  $k=0$ , gdy przechodzimy na reżim II sterowania/.

- jeśli  $W_J^G(p_j^k) > w_{G\max}^*$ , to

$$E_{2,2} = 10^{-4}$$

- jeśli  $W_J^T(p_j^k) > w_{T\max}^*$  i  $W_J^P(p_j^k) > w_{P\max}^*$ , to

dla numeru iteracji  $k \leq 15$ :

$$E_{1,1} = 2 \cdot 10^{-5}, \quad E_{1,3} = 5 \cdot 10^{-4}, \quad E_{3,3} = 5 \cdot 10^{-4}$$

dla  $k > 15$ :

$$E_{1,3} = 10^{-3}, \quad E_{3,3} = 10^{-3}$$

- jeśli  $W_J^T(p_j^k) > w_{T\max}^*$  i  $W_J^P(p_j^k) \leq w_{P\max}^*$ , to

dla  $k \leq 10$ :

$$E_{1,1} = 4 \cdot 10^{-5}, \quad E_{3,1} = 2 \cdot 10^{-5}$$

dla  $k > 10$ :

$$E_{1,1} = 10^{-4}, \quad E_{3,1} = 5 \cdot 10^{-5}$$



- jeśli  $w_j^T (P_j^k) \leq w_{Tmax}^*$  i  $w_j^P (P_j^k) > w_{Pmax}^*$ , to

$$E_{1,3} = 8 \cdot 10^{-5}, \quad E_{3,3} = 10^{-4}$$

Proces korekcji cen według tych zasad trwa dotąd, aż spełniony zostanie warunek

$$w_j (\bar{P}_j) \leq w_{max}^*$$

czyli dotąd, aż proponowana cena zapewni /według znacznie już dokładniejszego modelu/ dokonanie dostatecznie dużego, racjonalnego zrzutu i poborów nadmiaru wody.

Opisany w punkcie 3 sposób doboru macierzy E wynika z dokładniejszej analizy reagowania jednostek lokalnych na ceny  $p_T$ ,  $P_P$ . Zapewnia on /co sprawdziliśmy w symulacji/ dość szybko /w sensie liczby iteracji k algorytmu/ zrzucenie spodziewanego nadmiaru wody, a zarazem - racjonalne rozłożenie tego nadmiaru na użytkowników i zbiorniki dysponujące jeszcze zapasem pojemności.

Opisany schemat bieżącego sterowania retencją został opracowany na podstawie zarówno ogólnych /w dużej mierze intuicyjnych/ rozważań problemu, jak i analizy wyników symulacji. Badania symulacyjne pozwoliły na znalezienie właściwych parametrów liczbowych algorytmu. Jednocześnie dopiero w trakcie obliczeń można było zauważyć potrzebę wprowadzenia wielu istotnych modyfikacji algorytmu - szczegółowych zasad działania w różnych sytuacjach, które opisaliśmy w tym rozdziale.

W następnym punkcie przedstawimy wybrane wyniki symulacji. Ilustrują one działanie algorytmu w reżimach I i II.

### 3. Przykładowe wyniki symulacji

Symulacja numeryczna została opracowana przy wykorzystaniu danych rzeczywistych /historycznych/ o dopływach do systemu oraz przy użyciu modelu do generacji prognoz długoterminowych dopływu. Pozostałe dane - o ile to tylko było możliwe - oparte były na informacjach możliwych do zdobycia i maksymalnie wiarygodnych.

Praca systemu symulowana była w okresie roku hydrologicznego 1972.

W przyjętym przez nas schemacie sterowania warstwa wyższa /B/ dokonuje planowania retencji, a więc, interweniuje co 4 tygodnie. W każdej interwencji wykorzystywane są do wyznaczania polityki retencji prognozy długoterminowe następujących wielkości traktowanych przez nas jako zakłócenia: dopływów zewnętrznych do systemu, zapotrzebowań użytkowników na wodę i wreszcie prognozy zrzutów wody i zanieczyszczeń przez użytkowników. Horyzont planowania przez wyższą warstwę układu sterowania, a zarazem horyzont prognoz - wynosi 12 tygodni.

W wyniku rozwiązania zadania planowania retencji na horyzont 12 tygodni uzyskujemy trajektorie planowane  $\hat{w}_T$ ,  $\hat{w}_G$ ,  $\hat{w}_P$  dla zbiorników retencyjnych oraz odpowiednie wektory  $\hat{P}_T$ ,  $\hat{P}_G$ ,  $\hat{P}_P$  cen koordynujących zadanie

optymalizacji.

Oprócz trajektorii  $\hat{w}$  dysponujemy też trajektorią odniesienia  $w$ , ustaloną wstępnie na okres roku na podstawie danych o średnich bilansach czterotygodniowych dopływu.

Pomiędzy kolejnymi interwencjami warstwy wyższej, która koordynuje plan  $\hat{w}$  co 4 tygodnie, dokonywane są co tydzień interwencje warstwy niższej.

Interwencje te dokonywane są przy uwzględnieniu aktualizowanych krótkoterminowych prognoz zakłóceń.

Przyjęty został następujący schemat wykorzystywania aktualizowanej informacji o zakłóceniach:

- jednostki lokalne posługują się aktualizowanymi prognozami, zbliżonymi do rzeczywistych wartości tych zakłóceń.
- jednostka centralna - koordynator - posługuje się w swym algorytmie poprzednimi, nieaktualizowanymi prognozami zakłóceń zewnętrznych /dopływów/, ale informacje o przewidywanym działaniu jednostek lokalnych uzyskuje bezpośrednio od nich - od "decydentów lokalnych".

Symulacji dokonano na 13 okresach czterotygodniowych.

Uzyskane wyniki choemy natomiast przedstawić dla dwóch wybranych okresów czterotygodniowych:

- symulacji nr 11, kiedy to przewidywany był stan poważnego deficytu wody w systemie, a miała miejsce powódź,
- symulacji nr 13, kiedy to przewidywany był duży dopływ do zbiornika Tresna, a tymczasem wystąpił niedobór wody /dopływy rzeczywiste okazały się dużo niższe od przewidywanych/.

W tabelach 1 i 4 pokazane są przewidywane oraz zaobserwowane wielkości dopływów do zbiorników odpowiednio w okresie czasu odpowiadającym symulacji nr 11 oraz 13.

Wartości poszczególnych zmiennych decyzyjnych wyznaczane w procesie sterowania bieżącego pokazano dla dwóch przykładowych symulacji odpowiednio w tabelach 2 i 5, gdzie równocześnie zamieszczone zostały wielkości zapotrzebowania użytkowników na wodę.

W tabelach 3 i 6 zamieszczone zostały planowane oraz realizowane przebiegi trajektorii zmiennych stanu poszczególnych zbiorników retencyjnych systemu w okresach czasu odpowiadających symulacji nr 11 oraz 13.

Natomiast na rysunkach 1 i 2 przedstawione zostały pożądane i realizowane w ciągu rozpatrywanego roku hydrologicznego przebiegi trajektorii zmiennych stanu zbiorników Goczałkowice i Tresna.

Tabela 1

Prognozowane i zaobserwowane średnie dopływy do zbiornika Goczałkowice i Tresna (w m<sup>3</sup>/sec) przy symulacji 11

7.VIII. 21.VIII. 24.VIII. 25.VIII. 26.VIII. 27.VIII. 28.VIII. 4.IX.

Tygodnie dni Zbiornik	Tydzień 1		Tydzień 3				Tydzień 4	
	1	2	Dnie 1 - 3	Dzień 4	Dzień 5	Dzień 6	Dzień 7	
Goczałkowice prognoza	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
dopływ	5.29	4.26	107.48	107.48	107.48	107.48	107.48	6.7
Tresna prognoza	11.4	13.58	6.16	6.16	6.16	6.16	6.16	11.22
dopływ	9.37	6.59	163.	163.	163.	163.	163.	10.5

Tabela 2

7.VIII. 14.VIII. 21.VIII. 28.VIII. 4.IX.

Kałowice				
potrzeby -	9.9	10	10	9.5
przerzuty -	9.6	9.25	9.15	9.16
Bielsko				
potrzeby -	3.2	3.1	3.5	3.3
przerzuty -	2.91	2.67	≈3.4	3.13
Oświęcim				
potrzeby -	3.4	3.4	3.2	3.2
przerzuty	2.69	2.67	3.2	2.78
Dzieńkowice				
potrzeby -	4	4	4	3
przerzuty	3.05	3.03	4	2.45
Kety				
potrzeby -	1	1	1	1
przerzuty -	1	1	1	1
Zrzut z Goczałkowic	2.7	6.1	2	2
Zrzut z Tresnej	14.5	14.7	patrz tab. 2a	15
Zrzut z Czańca	9.4	10	patrz tab. 2a	8.6

Tabela 2a

Sterowanie zrzutami ze zbiorników T, P w czasie powodzi

21.VIII. 24.VIII. 25.VIII. 26.VIII. 27.VIII. 28.VIII.

Zrzut z Tresnej	8,4	36,1	162,3	163	163
Zrzut z Czańca	0,1	0,1	0,1	84	154

Tabela 3

Planowane i realizowane trajektorie zmiennych i stanu zbiorników retencyjnych (w mln m<sup>3</sup>) w symulacji 11

Tygodnie i dni	Goczałkowice		Tresna		Czaniec	
	Stan planowany	Stan osiągnięty	Stan planowany	Stan osiągnięty	Stan planowany	Stan osiągnięty
Stan początkowy		31,4		57,4		12,46
Po 1 tygodniu	32,8	30,6	56,8	54,3	11,22	10,46
Po 2 tygodniu	34,2	27,2	57,5	49,4	10,4	8,24
Po 3 dniach tygodnia		53,6		89,47		8,13
Po 4 dniu 3 tygodnia		62,4		100,43		10,49
Po 5 dniu 3 tygodnia		71,2		100,49		23,74
Po 6 dniu 3 tygodnia		80,		100,49		29,78
Po 7 dniu 3 tygodnia	35,6	88,8	53,7	100,49	8,37	29,78
Po 4 tygodniu	36,97	89,4	52,1	97,8	8,	28,42

Tabela 4

Prognozowane i zaobserwowane średnie dopływy tygodniowe do zbiorników Goczałkowice i Tresna (w m<sup>3</sup>/sec) przy symulacji 13

Zbiornik	2 IX.				29.X.
	1	2	3	4	
Goczałkowice prognoza	7.8	7.8	7.8	7.8	
dopływ	3.89	2.35	1.86	2.68	
Tresna prognoza	11.4	52.4	22.57	15.7	
dopływ	9.48	6.57	4.89	9.81	

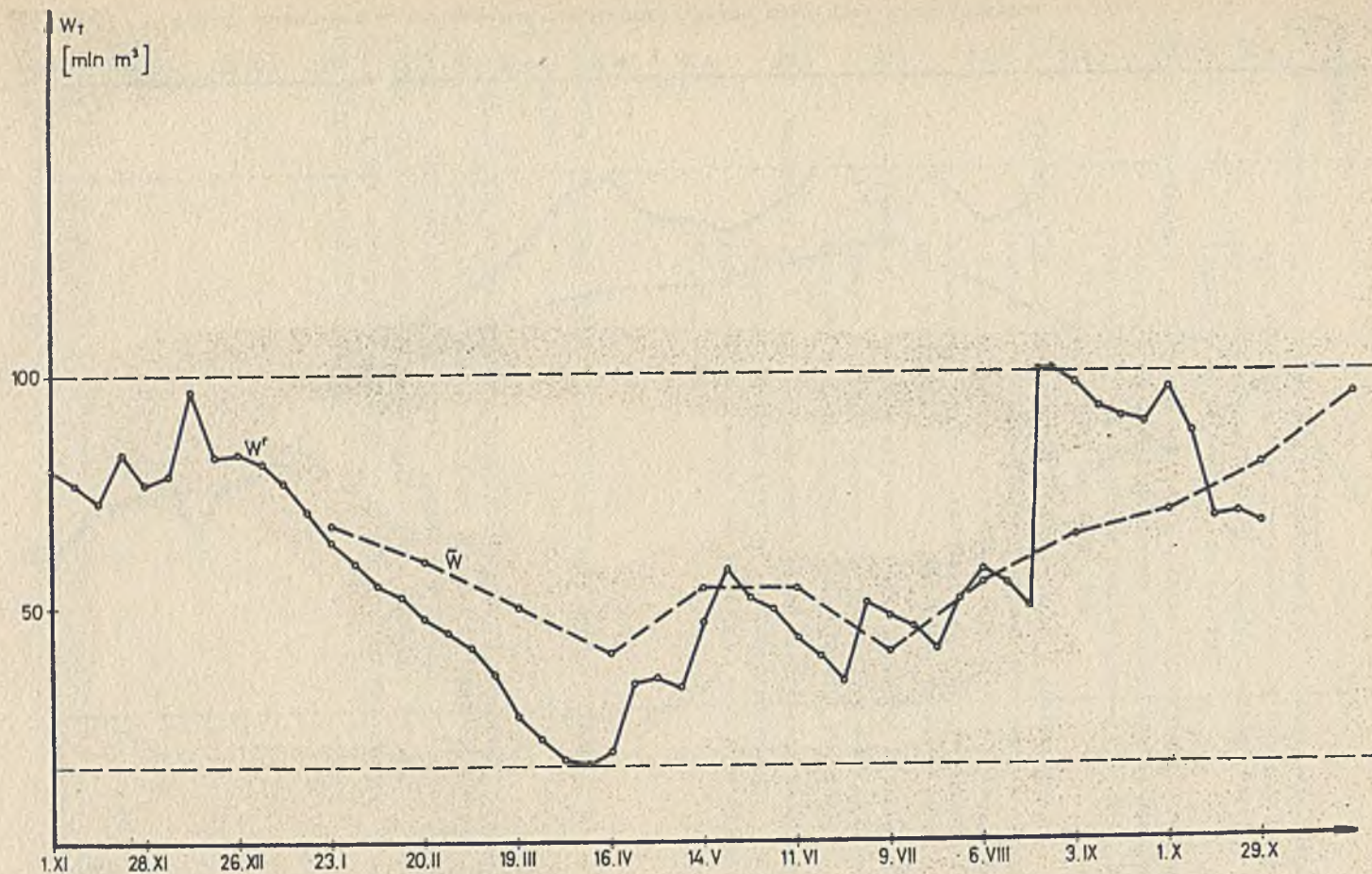
Tabela 5

Kategoria	2 IX.				29.X.
	1	2	3	4	
<u>Katowice</u> potrzeby -	9,2	9	9,5	9,8	
przerzuty -	9,25	8,94	9,39	9,6	
<u>Bielsko</u> potrzeby -	3,1	2,9	2,6	2,9	
przerzuty -	3,08	2,86	2,54	2,81	
<u>Oświęcim</u> potrzeby -	3,2	3	2,9	3	
przerzuty -	3,15	2,92	2,75	2,78	
<u>Dzieńkowice</u> potrzeby -	2,9	3	2,5	2,5	
przerzuty -	2,83	2,89	2,3	2,21	
<u>Kety</u> potrzeby -	1	1	1	1	
przerzuty	1	1	1	1	
Zrzut Goczałkowic	4,3	5,6	4,6	3,9	
Zrzut z Tresnej	25,9	35,7	3,8	13,1	
Zrzut z Czańca	25,6	15,2	12,4	9,1	

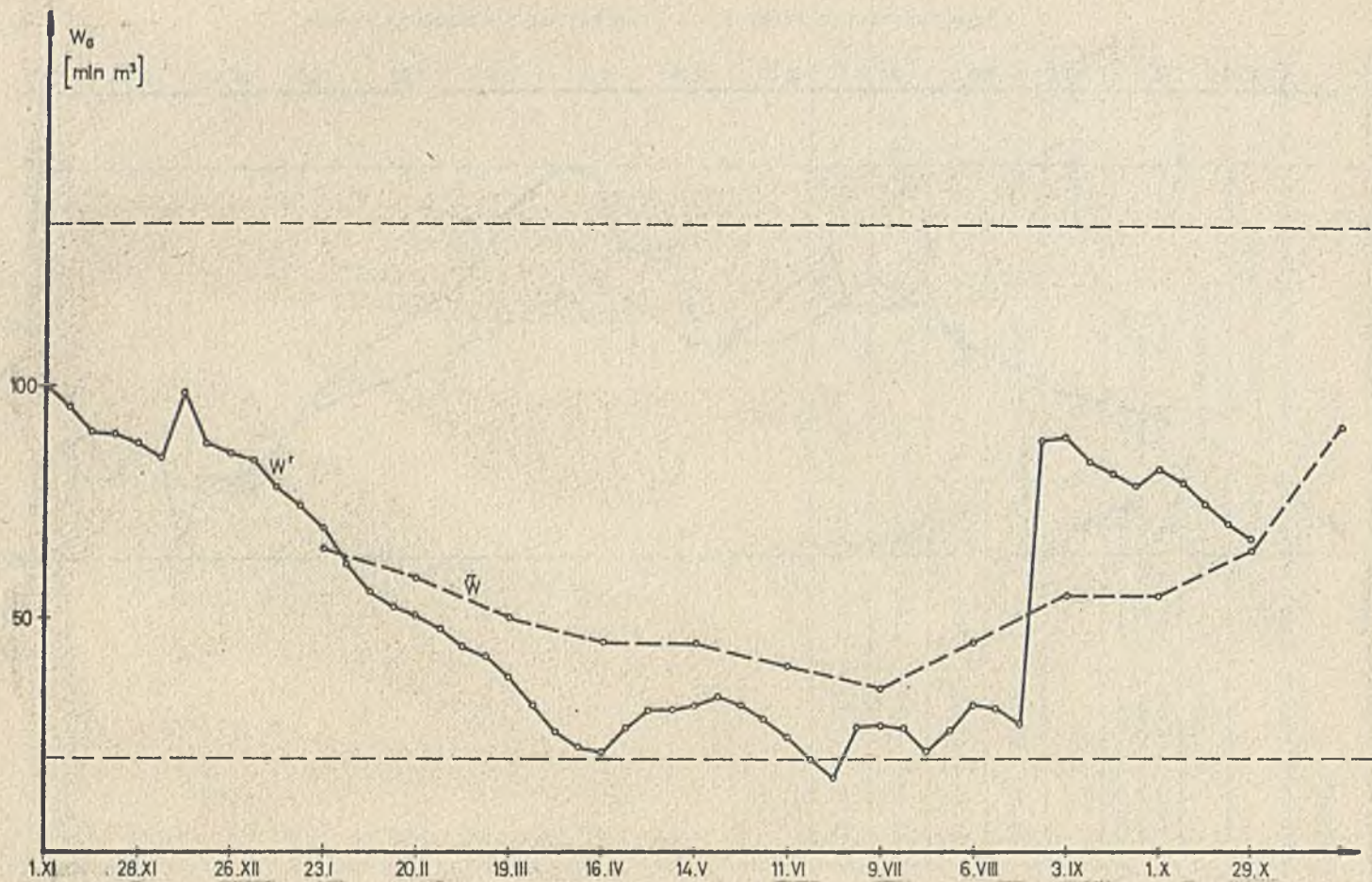
Tabela 6

Planowane i realizowane trajektorie zmiennych stanu zbiorników retencyjnych (w mln m<sup>3</sup>) w symulacji 13

Tygodnie	Goczałkowice		Tresna		Czaniec	
	Stan planowany	Stan osiągnięty	Stan planowany	Stan osiągnięty	Stan planowany	Stan osiągnięty
Stan początkowy	89.4		97.8		28.42	
Po 1 tygodniu	89.3	84	96.9	92.2	26.62	26.06
Po 2 tygodniu	89.2	81.4	95.1	90.2	24.12	21.11
Po 3 tygodniu	89.1	78.5	91.5	89.1	20.72	16.67
Po 4 tygodniu	89	82.4	88.4	96.4	17.63	15.47



Rys.1. Planowane i realizowane trajektorie zbiornika TRESNA



Rys.2. Planowane i realizowane trajektorie stanu zbiornika GOCZAŁKOWICE



## LITERATURA

- [1] Malinowski K., Salewicz K.A., Terlikowski T. - 'Koncepcja sterowania rozrzędem wody w systemie GOP z bieżącym wykonywaniem optymalizacji.' - Zeszyty Naukowe Polit. Śląskiej, s. Automatyka, z. 48, 1979 ..
- [2] Salewicz K.A. - Uproszczony model symulacyjny systemu - optymalizacja i zastosowanie metody korekcji cen do bieżącego sterowania. Opracowanie etapowe z prac w temacie PR-7.01.08.02, IMGW, Warszawa 1979.
- [3] Salewicz K.A., Terlikowski T., Bogobowicz A., Kozłowski A., Mrówka E. - 'Opracowanie i próbne uruchomienie algorytmu sterującego zbiorem modeli dla systemu wodno-gospodarczego w regionie przemysłowym.' - Raport końcowy z prac w temacie PR-7.01.08.02, IMGW, Warszawa 1980.
- [4] Terlikowski T. - Analiza wybranych hierarchicznych struktur sterowania optymalizującego dla systemów dynamicznych - Rozprawa doktorska, Wydział Elektroniki PW, 1979.
- [5] Malinowski K. i inni - Opracowanie metod koordynacji modeli opisujących działanie systemu wodno-gospodarczego. - Raport Instytutu Automatyki PW z prac w temacie PR.7.01.08.01., 1980 r.

## СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В СИСТЕМЕ С МНОГАМИ ВОДОХРАНИЛИЩАМИ.

## Резюме :

Рассматривается концепция многоуровневой структуры управления использованной для распределения водных ресурсов водно-хозяйственной системы. Основное внимание посвящено низшему уровню структуры, а особенно проблемам управления заполнением водохранилищ. Подробное описание предлагаемого принципа действия этого уровня иллюстрируется примером симулированного управления водно-хозяйственной системой.

THE CONTROL STRUCTURE FOR CURRENT WATER DISPATCHING  
IN A MULTIRESERVOIR SYSTEM

Summary

Conception of multilayer control structure for water resources allocation is discussed. Special attention is focused on the concept of the direct control layer of the proposed control structure and problems of current control of retention in reservoirs are discussed. The detail description of this layer's scheme of operation is provided and selected results of performed simulation are presented.