

WOJCIECH Z. CHMIEŁOWSKI*

ZASTOSOWANIE REGULATORÓW ROZMYTYCH
W ŚLEDZENIU WEKTORA TRAJEKTORII STANÓW
WIELOZBIORNIKOWEGO SYSTEMU
WODNOGOSPODARCZEGO
(CZĘŚĆ I. MODEL OPTYMALIZACYJNY)APPLICATION OF FUZZY REGULATORS TO TRACKING
A VECTOR OF RESERVOIR STATE TRAJECTORIES
OF A MULTI-RESERVOIR WATER MANAGEMENT SYSTEM
(PART I. OPTIMIZATION MODEL)

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono model optymalizacyjny pracy systemu zbiorników na rzecz aglomeracji korzystających z wody w ramach jej dystrybucji z systemu. Otrzymane w wyniku rozwiązania określonego zadania optymalizacji trajektorie sterowań i stanów zbiorników stanowią wytyczne dla regulatorów rozmytych (część II), których zadaniem będzie utrzymanie uzyskanych trajektorii w funkcji rzeczywistego dopływu do systemu zbiorników.

Słowa kluczowe: logika rozmyta, regulatory rozmyte, sterowanie, gospodarka wodna

Abstract

The paper presents an optimization model of an operation of a multi-reservoir system supplying water to several users. The achieved trajectories of controls and reservoirs' states should be treated as recommendations for fuzzy regulators (part II) which will be than to keep with these trajectories in relation to real inflows to reservoirs.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy regulators, control, water management

* Dr hab. inż. Wojciech Z. Chmielowski, prof. PK, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Regulatory rozmyte (*fuzzy sets*) oraz symulacyjny układ sterujący pracą wielozbiornikowego systemu zaopatrzenia w wodę zrealizowano w środowisku Matlab z zastosowaniem modułu (Toolbox) Fuzzy.

Schemat powiązań między kolejnymi elementami układu sterującego wielozbiornikowym systemem (m – zbiorników, n – odbiorców) przedstawiono na rys. 1.

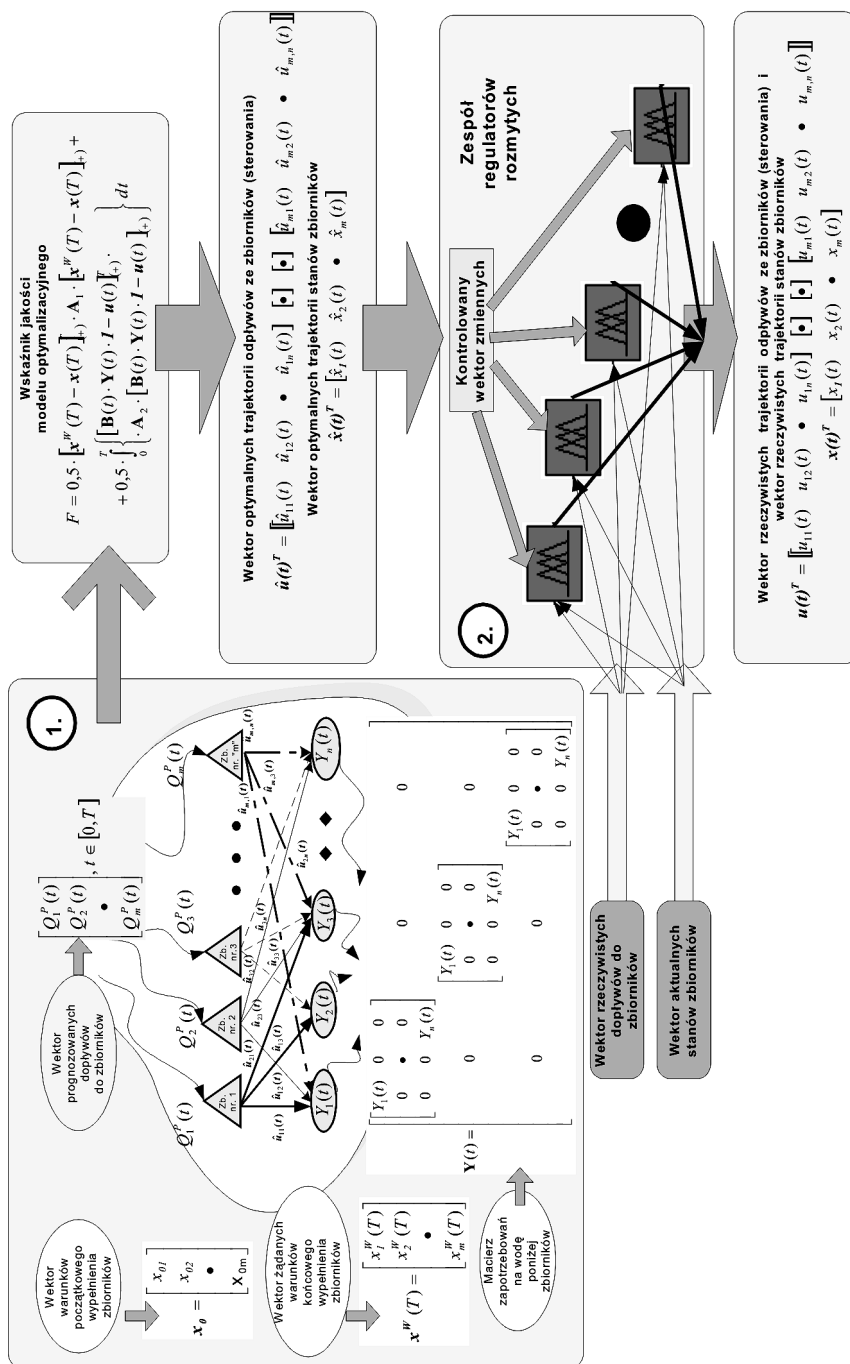
Układ sterowania systemem zbiorników działa w następujący sposób:

1. W pierwszej kolejności w modelu optymalizacyjnym wyliczane są trajektorie modelowo-optymalne sterowań (odpływów ze zbiorników) i modelowo-optymalne trajektorie stanów zbiorników w funkcji parametrów przyjętych do optymalizacji i przyjętego wskaźnika jakości (funkcji kryterialnej).
2. Następnie formowane są sygnały będące zakłóceniami, w szczególności:
 - różnice $Q_m^A(t)$ między wektorem dopływów prognozowanych a wektorem dopływów rzeczywistych,
 - wektor niekontrolowanych dopływów do systemu zbiorników $Q_m^n(t)$.
3. Na podstawie uzyskanych informacji oraz z uwzględnieniem wyboru:
 - śledzenie wektora modelowo-optymalnych trajektorii stanów $\hat{x}(t)$ lub
 - śledzenie wektora modelowo-optymalnych trajektorii sterowań (odpływów ze zbiorników) $\hat{u}(t)$,
 regulatory rozmyte realizują wektor sterowań rzeczywistych $u(t)$, $\forall t \in [0, T]$.
4. Wykorzystując równanie stanu systemu zbiorników w funkcji zrealizowanego sterowania rzeczywistego $u(t)$ i rzeczywistego dopływu, otrzymuje się rzeczywisty stan systemu $x(t)$, $\forall t \in [0, T]$.

2. Model optymalizacyjny

Ważniejsze oznaczenia w odniesieniu do systemów wielozbiornikowych:

T	– horyzont optymalizacji (czas trwania optymalizacji)
$x^w(T)$	– wektor wymaganych wypełnień końcowych zbiorników systemu
$x(T)$	– wektor wypełnień końcowych
$x^w(t)$	– wektor wymaganych trajektorii stanu w przedziale optymalizacji
$u^w(t)$	– wektor wymaganych trajektorii sterowań
x_0	– wektor wypełnień początkowych zbiorników
$\dot{x}(t)$	– wektor pochodnych stanu
$\hat{u}(t)_{(+)}, \hat{x}(t)$	– wektory optymalnych sterowań, optymalnych stanów
A_1, A_2	– macierze współczynników wag we wskaźniku jakości
$B(t)$	– blokowa macierz funkcji zaangażowania
$Y(t)$	– blokowa macierz funkcji zapotrzebowania
$Q^p(t - \tau(t))$	– wektor dopływów prognozowanych z uwzględnieniem opóźnień
S_1	– macierz strukturalna



Rys. 1. Schemat działania układu sterowania wielozbiornikowym systemem zaopatrzenia w wodę
Fig. 1. Scheme of a control system of a multi-reservoir water supply network

- $\mathbf{u}_{\min}(t), \mathbf{u}_{\max}(t)$ – wektory dolnych/górnych ograniczeń sterowania
 $\mathbf{x}_d(t), \mathbf{x}_g(t)$ – wektory dolnych/górnych ograniczeń stanu
 $\boldsymbol{\eta}(t)$ – wektor zmiennych sprzężonych
 $\boldsymbol{\mu}_{\min}(t), \boldsymbol{\mu}_{\max}(t)$ – wektory mnożników związanych z ograniczeniami sterowania
 $\boldsymbol{\lambda}_d(t), \boldsymbol{\lambda}_g(t)$ – wektory mnożników związanych z ograniczeniami stanu
 m – liczba zbiorników w systemie
 n – liczba odbiorców wody z systemu (aglomeracje)
 $i, i = 1, \dots, m$ – numer zbiornika
 $j, j = 1, \dots, n$ – numer odbiorcy (aglomeracji)
 $\hat{u}(t)_{x_i, \text{ster}}^{(+), j}$ – sterowanie optymalne (zbiornik i , odbiorca j) z uwzględnieniem ograniczenia stanu zbiornika i oraz ograniczeń sterowania

Celem artykułu jest analiza funkcjonowania układu sterowania z zastosowaniem regulatorów rozmytych, których jednym z sygnałów wejściowych jest rozwiązanie zadania optymalizacji pracy systemu wodnogospodarczego.

Przedstawione w artykule zadanie optymalizacji, wskazujące optymalne rozwiązania w świetle przyjętego wskaźnika jakości i ograniczeń, może wchodzić w skład modułów optymalizacyjnych, które stanowią jeden z elementów modeli automatyzacji procesu podejmowania decyzji sterujących. Zadania optymalizacji i bazujące na nich algorytmy dotyczą warstwy planowania krótkoterminowej retencji zbiorników systemu w warunkach ich normalnej eksploatacji.

Klasa zadań optymalizacji dotyczących systemów wodnogospodarczych jest bardzo duża [18], w szczególności jeśli chodzi o zadania programowania dynamicznego z kwadratowym wskaźnikiem jakości.

Uwzględnia się zasadniczo dwie formy wskaźnika jakości:

- optymalizacja pracy systemu zbiorników oparta na kwadratowym wskaźniku jakości będącym funkcjonalem zależnym od wektora sterowań (odpływów ze zbiorników) w całym horyzoncie optymalizacji i funkcji wektora stanów systemu (stanów zbiorników) w chwili T kończącej optymalizację,
- optymalizacja pracy systemu zbiorników oparta na kwadratowym wskaźniku jakości będącym funkcjonalem zależnym od wektora sterowań (odpływów ze zbiorników) i wektora stanów systemu (stanów zbiorników) w całym horyzoncie optymalizacji. Istotą tych zadań optymalizacyjnych jest możliwość oddziaływania na wektor trajektorii stanów zbiorników systemu w całym horyzoncie optymalizacji przez uwzględnienie we wskaźniku jakości kar za odchylenia od wektora trajektorii stanów zbiorników systemu traktowanych jako „wymagane”.

W obu wypadkach można dokonać dalszych podziałów zadań optymalizacji ze względu na inne uwarunkowania:

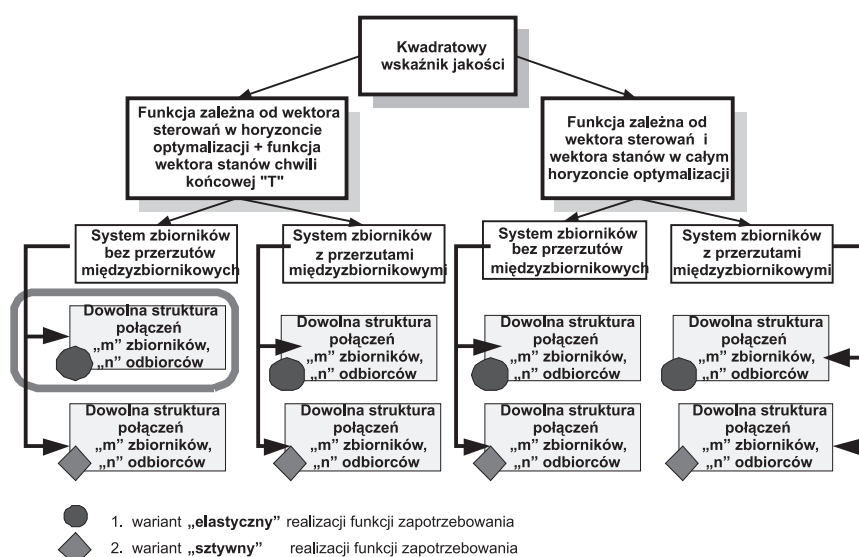
1. Strukturę systemu, którą tworzy m zbiorników, n odbiorców oraz powiązania między zbiornikami a odbiorcami.
2. Sposób realizacji funkcji zapotrzebowania (elastyczny, sztywny).
3. Uwzględnienie w ramach struktury systemu przerzutów międzyzbiornikowych.

Pojęcie „funkcja zapotrzebowania” odzwierciedla funkcję zaspokojenia popytu na wodę.

Elastyczny sposób realizacji funkcji zapotrzebowania $Y(t)$ wskazuje na grupę zadań optymalizacji, w których przyjęta postać wskaźnika jakości i ograniczeń dopuszcza moż-

liwość uzyskania wektora sterowań optymalnych (odpływów ze zbiorników), nie zawsze w całości spełniające wymagania dotyczące dystrybucji wody z systemu.

Sztywny sposób realizacji funkcji zapotrzebowania $Y(t)$ dotyczy zbioru zadań optymalizacji, w których realizacja przez wektor sterowań optymalnych tych funkcji jest absolutnie bezwarunkowa, zapewniając jednocześnie uwzględnienie celów (z odpowiednimi wagami) stawianych we wskaźniku jakości przy minimum jego wartości.



Rys. 2. Schemat powiązań między zadaniami optymalizacji
Fig. 2. Relations between optimization tasks

Różnica między tymi, z pozoru podobnymi, zadaniami jest istotna zarówno pod względem rozwiązania, jak i merytorycznym. Często zachodzą sytuacje, w których sztywny sposób realizacji funkcji zapotrzebowania jest zbyt restrykcyjny w stosunku do sterowania systemem, co powoduje, że na dalszy plan schodzą wszelkie analizy warunków końcowych wypełnień zbiorników, a wraz z nimi gwarancje spełnienia potrzeb w okresach następujących po przeprowadzeniu optymalizacji. Rozwiązanie takie preferuje odbiorców wody z systemu, ponieważ niemal w każdej sytuacji gwarantuje pozyskanie z systemu wymaganej ilości wody. Natomiast elastyczny sposób realizacji funkcji zapotrzebowania może prowadzić do nadmiernego rozluźnienia reżimu dystrybucji wody, co sprzyja magazynowaniu wody w systemie. Rozwiązanie takie, w wyniku odpowiedniego ustalenia współczynników wag we wskaźniku jakości, dopuszcza również możliwość dowolnego kształtowania preferencji odbiorców wody z systemu. Wymienione czynniki pozwalają na zbyt dużą dowolność przy interpretacji wyników optymalizacji. Oba zagadnienia są istotne, a stosowane w zależności od aktualnej sytuacji w systemie stanowią cenny instrument kształtujący zachowanie systemu.

Na potrzeby analizy działania regulatora rozmytego posłużymy się rozwiązaniem zadania optymalizacji pracy systemu wielozbiornikowego bez przerzutów międzyzbiornikowych, w wariancie „elastycznego” realizowania zapotrzebowania na wodę poniżej systemu.

Wariant elastyczny jest wariantem z macierzą $\mathbf{B}(t)$, $\forall t \in [0, T]$ funkcji zaangażowania kolejnych zbiorników w realizację poszczególnych funkcji zapotrzebowania na wodę w systemie, ujętych w macierzy $\mathbf{Y}(t)$, $\forall t \in [0, T]$. W zadaniu optymalizacji takie podejście dopuszcza możliwość częściowego zrealizowania przez układ zbiorników wymaganej w systemie macierzy funkcji $\mathbf{Y}(t)$, przy równoczesnym częściowym spełnieniu wymaganych warunków końcowych wypełnień zbiorników, zawartych w wektorze $\mathbf{x}^W(T)$.

Proporcje między tymi przeciwstawnymi celami ustalane są w wyniku określenia współczynników macierzy \mathbf{A}_1 odpowiedzialnej za realizację wymaganych stanów końcowych zbiorników $\mathbf{x}^W(T)$ oraz macierzy \mathbf{A}_2 , która decyduje o zrealizowaniu przez zespół zbiorników zapotrzebowania na wodę poniżej systemu zbiorników. Zapotrzebowanie reprezentowane jest funkcją $\mathbf{Y}(t)$.

W skrajnych wypadkach, przyjmując odpowiednio duże współczynniki macierzy \mathbf{A}_1 oraz odpowiednio wysoki poziom wypełnienia końcowego $\mathbf{x}^W(T)$, można, dążąc do realizacji $\mathbf{x}^W(T)$, całkowicie ograniczyć odpływ z konkretnego zbiornika (zbiorników), a zatem w ogóle nie realizować obowiązującej macierzy funkcji zapotrzebowania $\mathbf{Y}(t)$, $t \in [0, T]$, lub przyjmując odpowiednio duże współczynniki macierzy \mathbf{A}_2 oraz odpowiednio niski poziom wypełnienia końcowego $\mathbf{x}^W(T)$, można całkowicie zrealizować obowiązującą macierz $\mathbf{Y}(t)$, traktując tym samym wektor wypełnień końcowych $\mathbf{x}^W(T)$ jako zadanie podrzędne.

Struktura powiązań zbiorników z aglomeracjami odzwierciedlona jest w macierzach \mathbf{S}_1 , $\mathbf{B}(t)$, \mathbf{A}_2 , które zbudowane są na podstawie odpowiednio zdefiniowanych elementów.

2.1. Struktura koniecznych macierzy

Przyjmujemy oznaczenia:

K – zbiór indeksów możliwych połączeń zbiornika i z aglomeracjami,

U – zbiór indeksów zaistniałych połączeń zbiornika i z aglomeracjami.

Wówczas struktura macierzy będzie się przedstawiać następująco:

– Macierz strukturalna \mathbf{S}_1 (diagonalna macierz blokowa pokazująca strukturę powiązań zbiorników z aglomeracjami)

$$\mathbf{S}_1 \left(\text{diag}(m^*m)_{(1^n)} \right) : \left\{ i = 1, \dots, m; s_{i,i} = \mathbf{a}_{(1^n)} : \begin{cases} k = 1, \dots, n \in K, U \subset K \\ a_{k \in U} = 1 \\ a_{k \in K \setminus U} = 0 \end{cases} \right\} \quad (1)$$

– Macierz funkcji zaangażowania $\mathbf{B}(t)$

$$\mathbf{B}(t) \left\{ \text{diag}(m^*m)_{\text{diag}(n^*n)} \right\} : \left\{ i = 1, \dots, m; b_{i,i} = \mathbf{b}^*(t)_{\{\text{diag}(n^*n)\}} : \begin{cases} k = 1, \dots, n \in K, U \subset K \\ b_{i,k \in U}^*(t) = b_{i,k}(t) \\ b_{i,k \in K \setminus U}^*(t) = 0 \\ \sum_{i=1}^m b_{i,k}^*(t) = 1(t) \end{cases} \right\} \quad (2)$$

– Macierz \mathbf{A}_2 współczynników wag powiązanych z podcałkową częścią wskaźnika jakości

$$\mathbf{A}_2^{\{\text{diag}(m^*m)_{\text{diag}(n^*n)}\}} : \left\{ i = 1, \dots, m; a_{i,i} = \mathbf{a}^*_{\{\text{diag}(n^*n)\}} : \left\{ \begin{array}{l} k = 1, \dots, n \in K, U \subset K \\ a^*_{i,k \in U} = a^*_{i,k} \\ a^*_{i,k \in K \setminus U} = 1 \end{array} \right\} \right\} \quad (3)$$

– Macierz $\mathbf{Y}(t)$, której elementami są funkcje zapotrzebowania

$$\mathbf{Y}(t)_{\{\text{diag}(m^*m)_{n^*n}\}} : \left\{ i = 1, \dots, m : Y_{i,i} = \mathbf{Y}^*_{\{\text{diag}(n^*n)\}} : \left\{ \begin{array}{l} k = 1, \dots, n \\ Y^*_{k,k}(t) = Y^*_{k,k}(t) \end{array} \right\} \right\} \quad (4)$$

2.2. Rozwiązanie zadania optymalizacji

Korzystając z wprowadzonych oznaczeń i określeń, wskaźnik jakości dla uogólnionego systemu (rys. 1) można zapisać w postaci

$$F = 0,5 \left[\mathbf{x}^W(T)_{(m^*1)} - \mathbf{x}(T)_{(m^*1)} \right]_{(+)}^T \cdot \mathbf{A}_1(m^*m) \cdot \left[\mathbf{x}^W(T) - \mathbf{x}(T) \right]_{(+)} + \\ + 0,5 \int_0^T \left\{ \left[\mathbf{B}(t)_{(m^*m_{(n^*n)})} \cdot \mathbf{Y}(t)_{(m^*m_{(n^*n)})} \cdot \mathbf{I}_{(m^*1_{(n^*1)})} - \mathbf{u}(t)_{(m^*1_{(n^*1)})} \right]_{(+)}^T \cdot \right. \\ \left. \cdot \mathbf{A}_2(m^*m_{(n^*n)}) \cdot \left[\mathbf{B}(t) \cdot \mathbf{Y}(t) \cdot \mathbf{I} - \mathbf{u}(t) \right]_{(+)} \right\} dt \quad (5)$$

Równanie stanu uogólnionego systemu (stanu zbiorników) przyjmuje postać

$$\dot{\mathbf{x}}(t)_{(m^*1)} = \mathbf{Q}^P(t - \tau^P(t))_{(m^*1)} - \mathbf{S}_1(m^*m_{(1^*n)}) \cdot \mathbf{u}(t)_{(m^*1_{(n^*1)})} \quad (6)$$

z warunkiem początkowym wypełnienia zbiorników dla $t = 0$

$$\mathbf{x}(0)_{(m^*1)} = \mathbf{x}_0(m^*1) \quad (7)$$

Szczegółowe rozwiązanie zadania optymalizacji (5)–(7) dla uogólnionego systemu o strukturze zapisanej zgodnie z (1)–(4) można znaleźć w pracy [18]. Wektor trajektorii optymalnych sterowania przyjmuje postać

$$\hat{\mathbf{u}}(t)_{(+)} = \mathbf{B}(t) \cdot \mathbf{Y}(t) \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}_2^{-1} \cdot \mathbf{S}_1^T \cdot \\ \cdot \left\{ \left[\mathbf{I} + \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{S}_1^T \cdot T \right]^{-1} \cdot \mathbf{A}_1 \cdot \left\{ \mathbf{x}^W(T) - \mathbf{x}_0 - \int_0^T \left[\mathbf{Q}^P(t - \tau^P(t)) - \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{B}(t) \cdot \mathbf{Y}(t) \cdot \mathbf{I} \right] dt \right\} \right\} \quad (8)$$

Wektor optymalnych trajektorii stanu zbiorników wynikający z zastosowania wektora sterowań (8) przedstawia się następująco

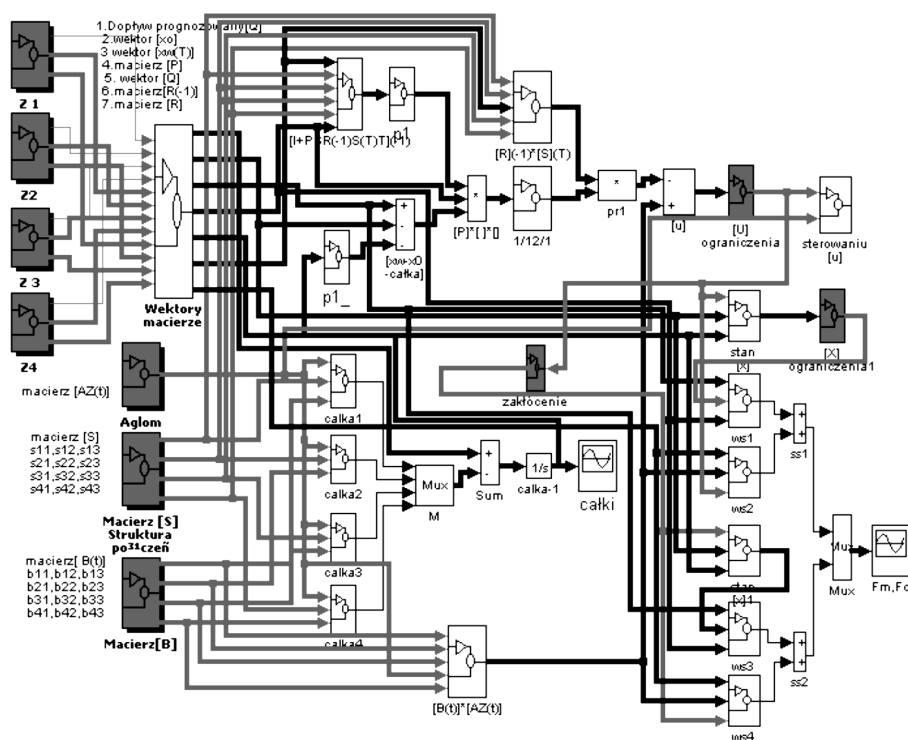
$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \int_0^t \left[\mathbf{Q}^P(\xi - \tau^P(\xi)) - \mathbf{S}_1 \cdot \hat{\mathbf{u}}(\xi)_{(+)} \right] d\xi + \mathbf{x}_0 \quad (9)$$

Minimalną wartość wskaźnika F_{\min} otrzymamy, podstawiając (8) i (9) do (5).

2.3. Symulacja pracy modelu optymalnego. Opis wyników

Rozwiązanie (8), (9) dotyczy uogólnionego systemu składającego się z m zbiorników i n aglomeracji odbierających wodę z systemu przy dowolnej strukturze połączeń. Struktura połączeń odzwierciedlona jest przez odpowiednie uformowanie macierzy $\mathbf{B}(t)$, $\mathbf{Y}(t)$, \mathbf{S}_1 , \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 w równaniu stanu i wskaźniku jakości.

Na potrzeby ilustracji przedstawionego problemu optymalizacji, a w dalszej konsekwencji systemu regulacji opartego na regulatorach rozmytych, należy przyjąć konkretną konfigurację systemu. Skonstruowany algorytm symulacyjny (Matlab/Simulink) (rys. 3) dopuszcza maksymalnie 4 zbiorniki i 3 aglomeracje, przy wszystkich możliwych kombinacjach połączeń między ww. elementami systemu.



Rys. 3. Schemat symulacji układu (5)–(9)
Fig. 3. Scheme of simulation for (5)–(9) system

Do dalszych rozważań przyjmiemy układ składający się z 4 zbiorników i 3 aglomeracji przy pełnej strukturze połączeń, tzn. z każdego zbiornika istnieje możliwość zasilania każdej aglomeracji.

Macierze konieczne do uformowania wskaźnika jakości i równań stanu przedstawiają się jak poniżej

$$\mathbf{B}(t) = \begin{bmatrix} [\bullet_1] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [\bullet_2] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [\bullet_3] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [\bullet_4] \end{bmatrix}$$

$$[\bullet_1] = \begin{bmatrix} b_{11}(t) & 0 & 0 \\ 0 & b_{12}(t) & 0 \\ 0 & 0 & b_{13}(t) \end{bmatrix}$$

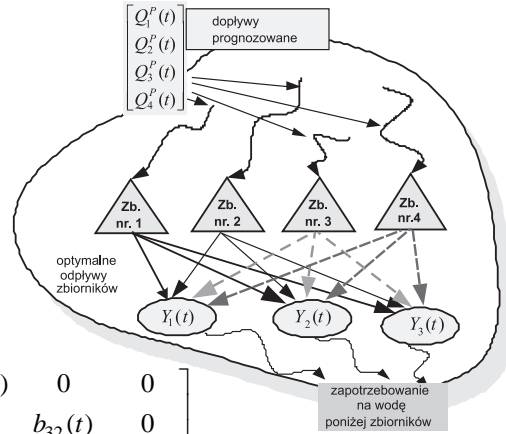
$$[\bullet_2] = \begin{bmatrix} b_{21}(t) & 0 & 0 \\ 0 & b_{22}(t) & 0 \\ 0 & 0 & b_{23}(t) \end{bmatrix} \quad [\bullet_3] = \begin{bmatrix} b_{31}(t) & 0 & 0 \\ 0 & b_{32}(t) & 0 \\ 0 & 0 & b_{33}(t) \end{bmatrix}$$

$$[\bullet_4] = \begin{bmatrix} b_{41}(t) & 0 & 0 \\ 0 & b_{42}(t) & 0 \\ 0 & 0 & b_{43}(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} [*_1] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [*_2] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [*_3] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [*_4] \end{bmatrix}$$

$$[*_1] = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_{13} \end{bmatrix} \quad [*_2] = \begin{bmatrix} a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} \end{bmatrix} \quad [*_3] = \begin{bmatrix} a_{31} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}$$

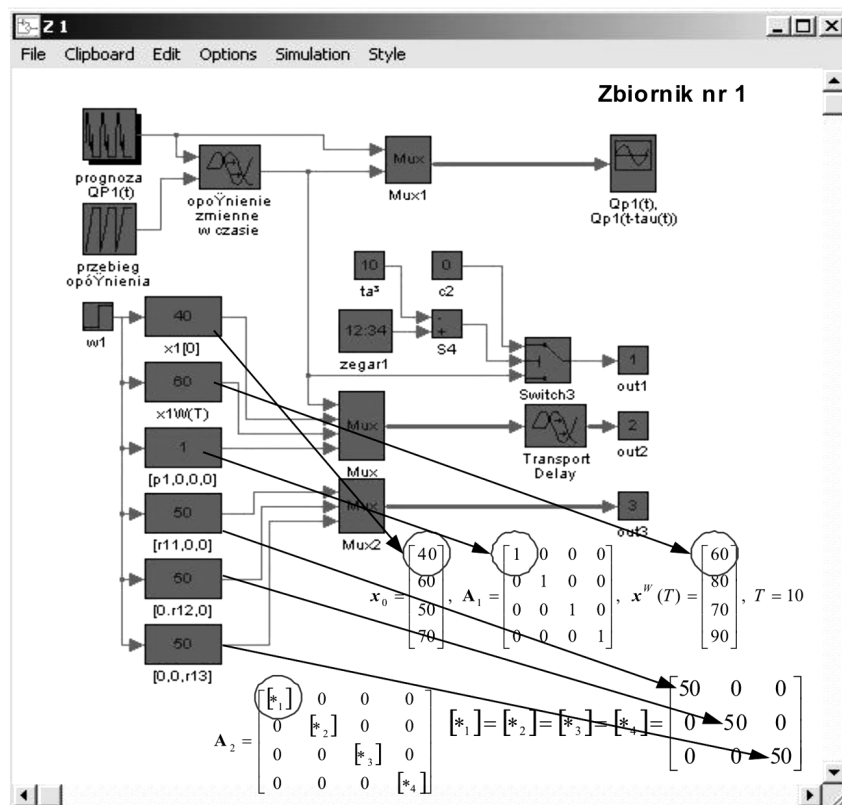
$$[*_4] = \begin{bmatrix} a_{41} & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} [1 & 1 & 1] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [1 & 1 & 1] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [1 & 1 & 1] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [1 & 1 & 1] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} [\bullet] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [\bullet] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [\bullet] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [\bullet] \end{bmatrix}, \quad [\bullet] = \begin{bmatrix} Y_1(t) & 0 & 0 \\ 0 & Y_2(t) & 0 \\ 0 & 0 & Y_3(t) \end{bmatrix}$$



Rys. 4. Uformowane macierze wg przyjętej struktury
Fig. 4. Matrices formed according to the assumed structure

W dalszej kolejności wprowadzenie konkretnych wartości wejściowych precyzuje cały system. W celu ustawienia wypełnień początkowych i żądanych końcowych poszczególnych zbiorników, dopływów prognozowanych oraz elementów macierzy A_1 , A_2 korzystamy z okienek dialogowych Z1, Z2, Z3, Z4 algorytmu symulującego.



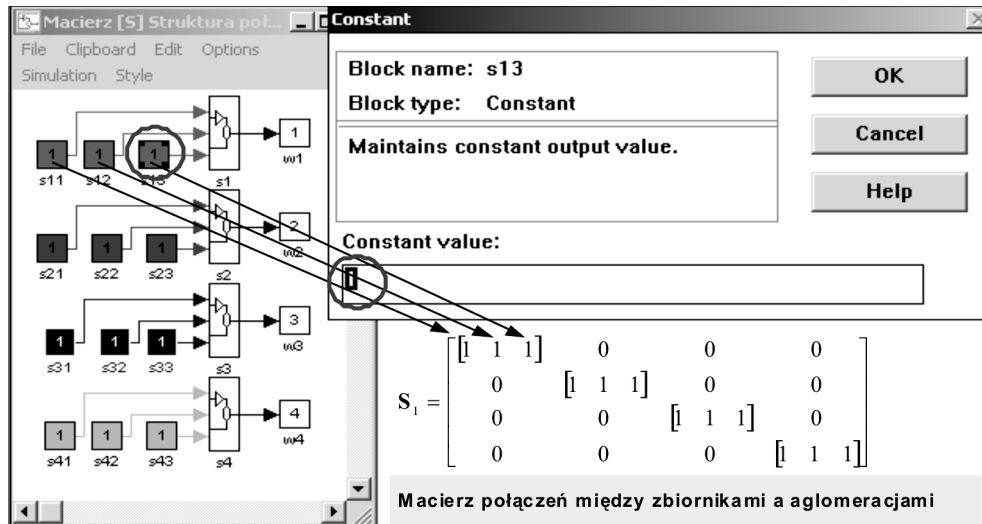
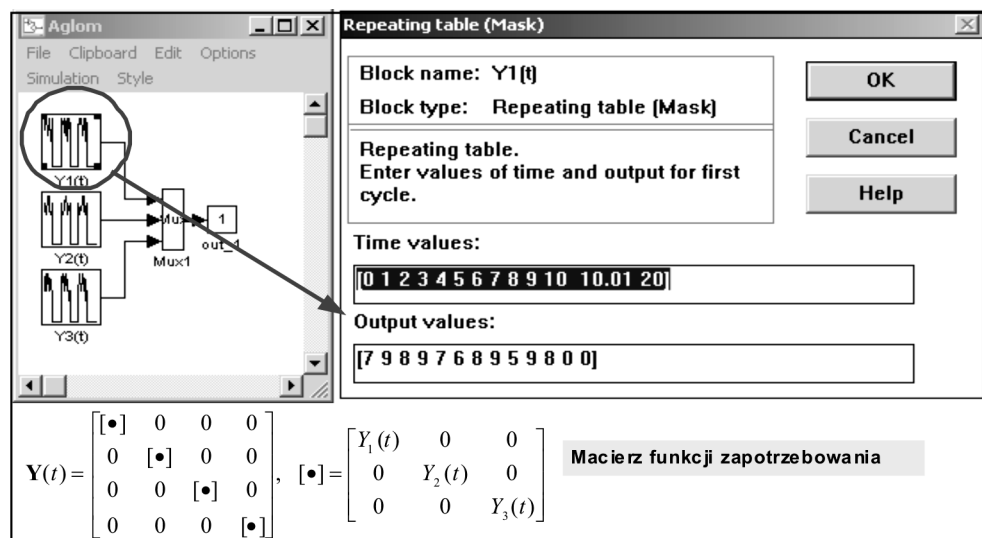
Rys. 5. Okno dialogowe dotyczące parametrów zbiorników i macierzy A_1 , A_2
Fig. 5. Dialog window for setting reservoir parameters and matrices A_1 , A_2

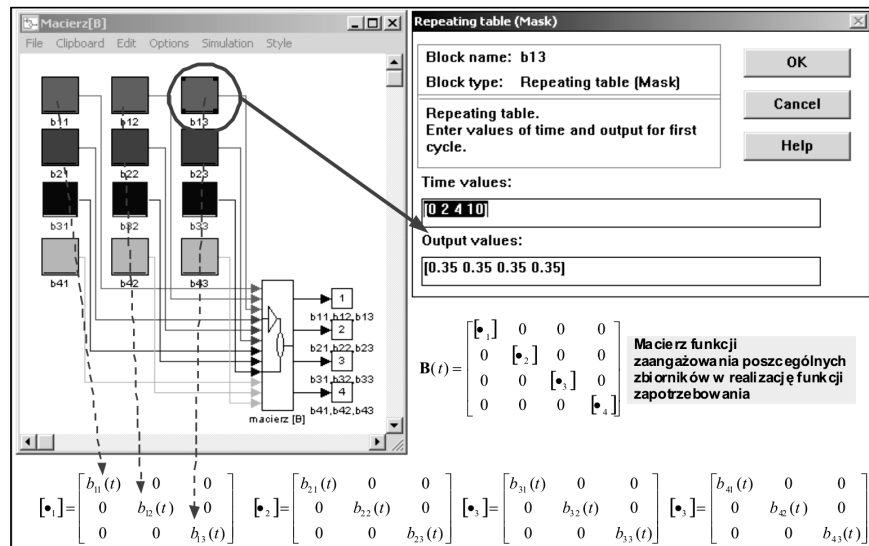
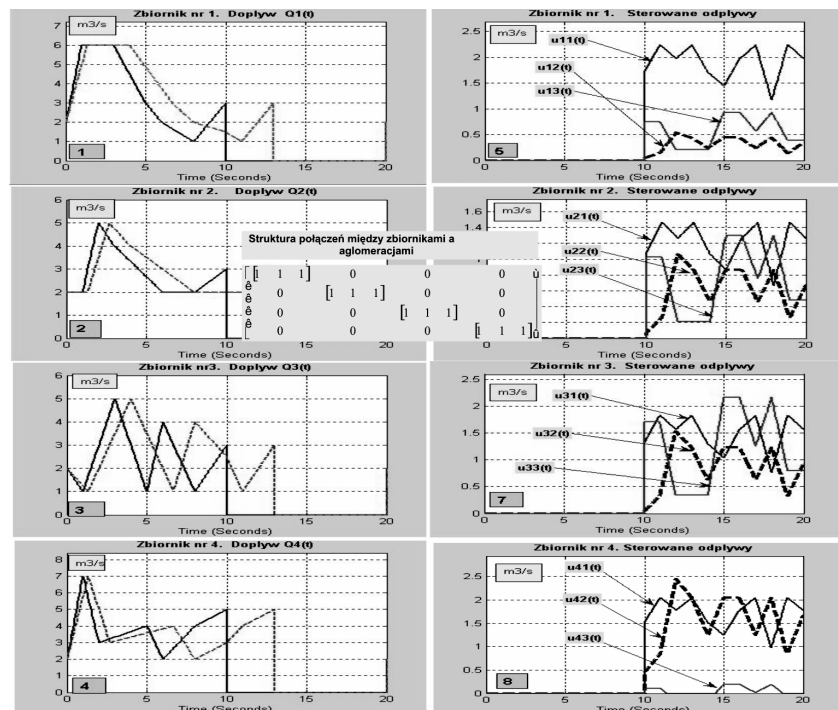
Ustawienie konfiguracji połączeń między zbiornikami a aglomeracjami oraz wprowadzenie funkcji zapotrzebowań, a następnie funkcji zaangażowań kolejnych zbiorników w realizację funkcji zapotrzebowań dokonuje się w kolejnych okienkach dialogowych.

Na rysunku 9 zestawiono wykresy przedstawiające realizację symulacji dla przyjętych parametrów dotyczących zbiorników.

Wykresy 1–4 przedstawiają:

- prognozowane dopływy do kolejnych zbiorników $Q_i^P(t)$, $i = 1, \dots, 4$,
- prognozowane dopływy do kolejnych zbiorników, z uwzględnieniem opóźnień transformacji dopływu przez zbiornik z punktu będącego punktem kontrolnym dopływu wody do zbiornika do punktu stanowiącego kontrolowany upust wody $Q_i^P(t - \tau_i(t))$, $i = 1, \dots, 4$, przy założeniu $t = 0$, $\tau_i(t) = 0$.

Rys. 6. Okno dialogowe ustalające strukturę połączeń (macierz S_1)Fig. 6. Dialog window for setting a relation structure (matrix S_1)Rys. 7. Okno dialogowe ustalające macierz zapotrzebowań (macierz $Y(t)$)Fig. 7. Dialog window for setting a demand matrix $Y(t)$

Rys. 8. Okno dialogowe ustalające macierz zaangażowania (macierz $B(t)$)Fig. 8. Dialog window for setting an involvement matrix $B(t)$ 

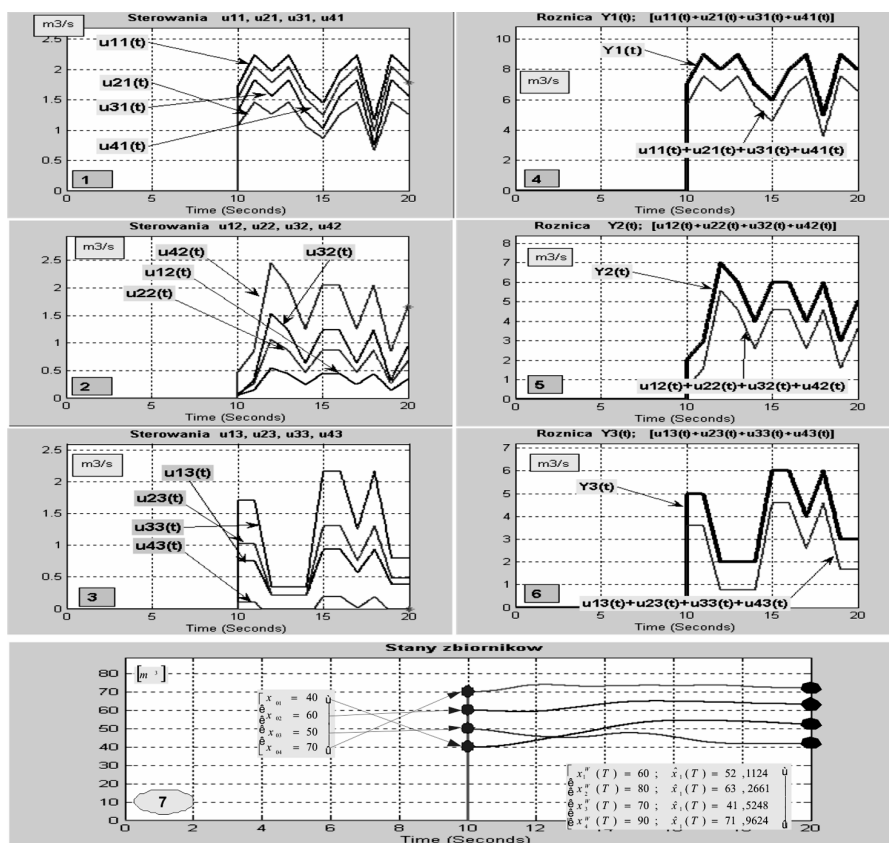
Rys. 9. Dopływy do zbiorników, optymalne wg (5) odpływy ze zbiorników do aglomeracji

Fig. 9. Inflows to reservoirs, optimal (according to (5)) discharges from reservoirs to water users

Wykresy 5–8 zawierają trajektorie modelowo- optymalne (m-o) sterowań (odpływów) ze zbiorników $i = 1, \dots, 4$ do aglomeracji $j = 1, \dots, 3$. Struktura powiązań między zbiornikami a aglomeracjami zawarta w macierzy S_1 wskazuje na istnienie wszystkich możliwych połączeń zbiorników z aglomeracjami.

W wyniku przyjęcia odpowiednich wartości współczynników macierzy A_2 wektor funkcji zapotrzebowania został częściowo zrealizowany. Odpływy ze zbiorników $\hat{u}_{ij}(t)_{(+)}$ częściowo pokrywają się z zapotrzebowaniami $b_{ij}(t) \cdot Y_j(t)$ przypadającymi na kolejne zbiorniki systemu. Pamiętajmy, że częściowe zapotrzebowania wyznaczone są przez zainicjowane funkcje zaangażowania $b_{ij}(t)$.

Na rysunku 10 zestawiono wykresy przedstawiające realizację symulacji dla przyjętych parametrów dotyczących aglomeracji.



Rys. 10. Realizacja symulacji dla przyjętych parametrów (aglomeracje)
Fig. 10. Simulation for the assumed parameters (water users)

Wykresy 1–3 przedstawiają trajektorie sterowań optymalne $\hat{u}_{i,j}(t)_{(+)}$ ze zbiorników $i = 1, \dots, 4$ składające się na realizacje funkcji zapotrzebowania $Y_j(t)$, $j = 1, \dots, 3$. Zgodnie

z informacją zawartą w macierzy \mathbf{S}_1 , aby zrealizować poszczególne funkcje, musi pracować określona liczba zbiorników: $Y_1(t)$ – 4 zbiorniki (1, 2, 3, 4), $Y_2(t)$ – 4 zbiorniki (1, 2, 3, 4), $Y_3(t)$ – 4 zbiorniki (1, 2, 3, 4).

Wykresy 4–6 przedstawiają trajektorie funkcji będących sumami $\sum_{i=1}^4 \hat{u}_{i,j}(t)_{(+)}$,

$j = 1, \dots, 3$ oraz trajektorie funkcji zapotrzebowania $Y_j(t)$, $j = 1, \dots, 3$. Jeszcze raz należy podkreślić, że w wyniku przyjęcia odpowiednich współczynników macierzy \mathbf{A}_2 w odniesieniu do współczynników macierzy \mathbf{A}_1 wymienione trajektorie częściowo pokrywają się, co świadczy o procentowym zrealizowaniu przez zbiorniki wymaganych w systemie funkcji $Y_j(t)$, $j = 1, \dots, 3$ oraz częściowej realizacji drugiego składnika wskaźnika jakości.

Na wykresie 7 przedstawiono wektor optymalnych stanów zbiorników $\hat{\mathbf{x}}(t)$ otrzymanych w wyniku realizacji sterowania $\hat{\mathbf{u}}(t)_{(+)}$. Ukierunkowanie przykładu optymalizacji na częściowe spełnienie wymaganych w systemie funkcji zapotrzebowania $Y_j(t)$, $j = 1, \dots, 3$ powoduje, że wartości otrzymanych stanów $\hat{x}_i(t)$, $i = 1, \dots, 3$, $t = T$ również częściowo odbiegają od żądanych stanów wypełnień $x_i^W(t)$, $i = 1, \dots, 3$ dla chwili końcowej T . Fakt ten powoduje naliczenie kary wg pierwszego składnika wskaźnika jakości (5).

3. Podsumowanie części I

Materiał prezentowany w niniejszym artykule przedstawia sposób zapisu struktury uogólnionego systemu wodnogospodarczego składającego się z m zbiorników zasilających w wodę n aglomeracji. Struktura systemu i powiązania pomiędzy jego elementami (zbiorniki, aglomeracje), następnie sterowane odpływy ze zbiorników oraz odpowiadające im trajektorie stanów zbiorników zapisane są w postaci odpowiednio zdefiniowanych macierzy i wektorów

$$\mathbf{A}_1(m^*m), \mathbf{A}_2(m^*m_{(n^*n)}), \mathbf{S}_1(m^*m_{(n^*n)}), \mathbf{Y}(t)_{(m^*m_{(n^*n)})}$$

$$\mathbf{B}(t)_{(m^*m_{(n^*n)})}, \mathbf{u}(t)_{(m^*1_{(n^*1)})}, \mathbf{x}(t)_{(m^*1)}, \mathbf{1}_{(m^*1_{(n^*1)})}$$

Z uwzględnieniem uogólnionej wymiarowości wyżej wymienionych macierzy i wektorów uformowane zostały wskaźnik jakości systemu, równanie stanu systemu, ograniczenia sterowania i stanu zbiorników. Następnie przedstawiono rozwiązanie optymalne zapisanego problemu, sprowadzające się do wektora sterowań optymalnych $\hat{\mathbf{u}}(t)_{(+)_{(m^*1_{(n^*1)})}}$ oraz odpowiadające mu wektora optymalnych trajektorii stanów systemu $\hat{\mathbf{x}}(t)_{(m^*1)}$.

Korzystając z zaobserwowanych prawidłowości w budowie macierzy i wektorów dla uogólnionego systemu wodnogospodarczego ocenianego przyjętym wskaźnikiem jakości, można zapisać rozwiązanie optymalne $\{\hat{\mathbf{u}}(t)_{(+)}, \hat{\mathbf{x}}(t)\}$ dla systemu obejmującego zbiorniki i aglomeracje funkcjonujące na podstawie konkretnej struktury powiązań pomiędzy jego elementami.

Model symulacyjny przedstawiony w artykule, zrealizowany za pomocą języka Matlab/Simulink, umożliwia symulację zadania optymalizacji pracy różnie skonfigurowanych systemów wodnogospodarczych, począwszy od systemu {zbiornik 1, aglomeracja 1}, {zbiornik 1, aglomeracje 2}, ..., na systemie {4 zbiorniki, 3 aglomeracje (wszystkie połączenia wykorzystane)} kończąc.

Ze względu na znaczny zbiór konfiguracji, mieszczący się w ramach ograniczeń modelu (4 zbiorniki, 3 aglomeracje), przedstawiony model symulacyjny może być niezwykle przydatnym narzędziem w pracach poznawczych i – ewentualnie – planistycznych, związanych z podziałem zadań w systemie oraz zagospodarowaniem i rozdziałem zasobów wodnych mieszczących się w ramach wyodrębnionego analizowanego systemu wodnogospodarczego.

Część pierwsza artykułu kończy się omówieniem wyników symulacji z wykorzystaniem hipotetycznych danych tworzących tzw. scenariusz zdarzeń w obrębie analizowanego systemu. Wyniki symulacji stanowią w każdym wypadku przewidywany hydrogram odpływów ze zbiorników na cały horyzont optymalizacji, uwzględniający w razie konieczności ograniczenia dotyczące urządzeń spustowych zbiorników oraz cele zawarte we wskaźniku jakości. Analiza odpowiednio dużego zbioru hipotetycznych sytuacji umożliwia skuteczne ustalenie zakresu zmienności głównych parametrów systemu $x^W(T)$, $B(t)$, $Y(t)$, A_1 , A_2 , które wpływają na wektor sterowań m-o $\hat{u}(t)_{(+)}$ i wektor stanów m-o $\hat{x}(t)$.

Otrzymane optymalne trajektorie sterowań i stanów zbiorników w funkcji prognozowanych dopływów do systemu zbiorników stanowią wytyczne dla regulatorów rozmytych, których zadaniem będzie utrzymanie ww. trajektorii w funkcji rzeczywistego wektora dopływów do zbiorników systemu.

Literatura

- [1] Aoki S., Kwachi S., *Application of fuzzy control for dead-time processes in a glass melting furnace*, Fuzzy Sets and System 1990, Vol. 38, No. 5, 251-256.
- [2] Aracil J., Garcia-Cezero A., Ollero A., *Fuzzy control of dynamical system. Stability analysis based on the conicity criterion*, Proc. 4th Item. Fuzzy System Association Congress, Brussels, Belgium 1991, 5-8.
- [3] Arita S., Tsutsui T., *Fuzzy logic control of blood pressure through inhalational anesthesia*, Proc. of the Int'l Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks, II Zuka, Japan 1990, 545-547.
- [4] Arita S., *Development of an ultrasonic cancer diagnosis system using fuzzy theory*, Japanese Journal of Fuzzy Theory and System 1991, Vol. 3, No. 3, 215-230.
- [5] Babuska R., *Fuzzy modeling – a control engineering perspective*, Proc. Inter. Conf. FUZZ-IEEE/IFES '95 Yokohama, Japan 1995, 1897-1902.
- [6] Cao S.G., Rees N.W., Feng G., *Analysis and design for a class of complex control system – Part I: Fuzzy modeling and design*, Automatica 1997, Vol. 33, No. 6, 1017-1028.

- [7] Cao S.G., Rees N.W., Feng G., *Analisis and design for a class of complex control system – Part II: Fuzzy controller design*, Automatica 1997, Vol. 33, No. 6, 1029-1039.
- [8] Chmielowski W.Z., Twaróg B., *Regulator rozmyty sterujący przejściem fali powodziowej przez zbiornik retencyjny. Część I. Podstawy teoretyczne*, Czasopismo Techniczne, z. 10-Ś/2006, Wyd. PK, Kraków 2006.
- [9] Chmielowski W.Z., *Hierarchiczny regulator rozmyty sterujący przejściem fali powodziowej przez zbiornik retencyjny. Część II. Symulacja*, Czasopismo Techniczne, z. 1-Ś/2009 (niniejszy zeszyt), Wyd. PK, Kraków 2009.
- [10] Chmielowski W.Z., *Symulacyjny model sterowania nadążnego zbiornikiem retencyjnym w obecności zakłóceń*, Czasopismo Techniczne, z. 2-Ś/2002, Wyd. PK, Kraków 2003.
- [11] Chmielowski W.Z., *Symulacyjny model sterowania nadążnego zespołem zbiorników retencyjnych*, Czasopismo Techniczne, z. 1-Ś/2003, Wyd. PK, Kraków 2003.
- [12] Chmielowski W.Z., *Zadanie optymalizacji dla uogólnionego systemu wodnogospodarczego o dowolnej strukturze połączeń*, Czasopismo Techniczne, z. 1-Ś/2003, Wyd. PK, Kraków 2003.
- [13] Chmielowski W.Z., *Ograniczenia stanu i sterowania, jako element problemu optymalizacji pracy zbiornika retencyjnego*, Czasopismo Techniczne, z. 7-Ś/2003, Wyd. PK, Kraków 2003.
- [14] Chmielowski W.Z., *Zagadnienie optymalizacyjne w systemie zbiorników retencyjnych przy warunku konieczności zaspokojenia potrzeb*, Czasopismo Techniczne, z. 8-Ś/2004, Wyd. PK, Kraków 2004.
- [15] Chmielowski W.Z., *Ograniczenia stanu i sterowania jako element optymalizacji wielozbiornikowego systemu wodnogospodarczego (część I)*, Czasopismo Techniczne, z. 16-Ś/2005, Wyd. PK, Kraków 2005.
- [16] Chmielowski W.Z., *Ograniczenia stanu i sterowania jako element optymalizacji wielozbiornikowego systemu wodnogospodarczego (część II)*, Czasopismo Techniczne, z. 16-Ś/2005, Wyd. PK, Kraków 2005.
- [17] Chmielowski W.Z., *Przerzuty międz zbiornikowe w systemie współpracujących zbiorników retencyjnych*, Konferencja nt. „Ochrona i Inżynieria Środowiska – Zrównoważony Rozwój”, AGH, 16–18 września 2004, Kraków.
- [18] Chmielowski W.Z., *Metody wspomagania decyzji przy sterowaniu systemami zbiorników retencyjnych służących zaopatrzeniu w wodę*, Monografia nr 298, seria: Środowisko, Politechnika Krakowska, Kraków 2004.
- [19] Hajek M., *Optimization of fuzzy rules by using a genetic algorithm*, Proc. The Third International Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision ICARV '94, Singapor, Vol. 4, 1994, 2111-2115.
- [20] Kacprzyk J., *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*, WNT, Warszawa 2001.
- [21] Kageyama Sh., *Blood glucose control by a fuzzy control system*, Int. 1 Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks, Iizuka, Japan 1990, 557-560.
- [22] Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, EXIT, Warszawa 2001.
- [23] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, EXIT, Warszawa 2003.
- [24] Rudkowska D., Piliński M., Rudkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, WN PWN, Kraków 1997.

- [25] Tobi T., Hanafusa T., *A practical application of fuzzy control for an air-conditioning system*, International Journal of Approximate Reasoning, No. 5, 1991, 331-348.
- [26] Yager R.R., Filev D.P., *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1995.