

Mieczysław BRDYŚ

Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej

Mirosław ŚWIERCZ

Bogumił ULANICKI

Instytut Elektrotechniki Politechniki Białostockiej

STEROWANIE RETENCJĄ I PRZEPLYWEM W PRZYKŁADOWYM SYSTEMIE
WODNO-GOSPODARCZYM. KONCEPCJA UKŁADU I WYNIKI SYMULACJI.

Streszczenie. W pracy przedstawiono koncepcję sterowania systemem retencji i przepływu zawierającym trzy zbiorniki retencyjne powiązane odcinkami rzek. Trójwarstwowy układ sterowania został skonstruowany zgodnie z koncepcją hierarchii czasowej. Przedstawiono wyniki symulacji działania układu sterowania na odcinku czasu równym 9 miesięcy.

1. Opis systemu wodno-gospodarczego.

Schemat rozważanego systemu przedstawiono na rys.1. W jego skład wchodzi: rzeka z jednym dominującym dopływem bocznym, trzy zbiorniki retencyjne (2 na rzece i 1 na dopływie) oraz trzech odbiorców wody - miasta przemysłowe o poborze charakterystycznym dla przemysłu wielozmianowego. Pominęto położonych wzdłuż rzeki odbiorców rolniczych, zaś zjawisko spływu powierzchniowego oraz małe dopływy boczne sprowadzono do węzłów.

Sterowanie systemem powinno zapewniać zaspokojenie zapotrzebowania na wodę odbiorców miejskich, racjonalne gospodarowanie zasobami wód podziemnych w miastach, ochronę przeciwpowodziową oraz utrzymanie odpowiedniego przepływu wody w systemie i na jego wyjściu (niezbędnego do ochrony życia biologicznego i nawożenia terenów rolniczych). Analiza powyższych celów prowadzi do wyodrębnienia trzech zadań sterowania, które mogą być rozwiązywane oddzielnie: sterowania retencją i przepływem, sterowania jakością wody i sterowania dystrybucją.

Poniżej rozważa się zadania sterowania retencją i przepływem. Celem sterowania retencją i przepływem jest pokrycie zapotrzebowania na wodę odbiorców miejskich oraz wyrównania przepływów za zbiornikami retencyjnymi. Założono, że zjawiska hydrologiczne zachodzą cyklicznie, przy czym długość horyzontu wynosi 1 rok (365 dób) i dla takiego horyzontu czasowego rozwiązywano zadanie sterowania retencją i przepływem. Za zmienne de-

czyjne zadania przyjęto wielkości dobowych poborów wody przez miasta oraz zrzutów ze zbiorników retencyjnych. Za stan systemu przyjęto wielkości zapełnień zbiorników retencyjnych V2, V4, V6. Na wartości sterowań, stanu i wyjścia QP9P systemu nałożono naturalne ograniczenia fizyczne. Formalny opis zadania sterowania retencją i przepływem zamieszczono w punkcie 2.

Model matematyczny systemu sformułowano przyjmując, że na odcinku elementarnym zachodzą procesy gromadzenia i transportu (tzw. zmodyfikowany model Nasha), zaś dla zbiornika retencyjnego transport może być pominięty. Tak więc (por. rys.1):

$$T1i \cdot \frac{dQKi(t)}{dt} = -QKi(t) + QPi(t - TOi) \quad i=1,3,5,7,8 \quad (1)$$

$$\frac{dVi(t)}{dt} = QSi(t) \quad (2)$$

$$QSi(t) = QPi(t) + QDi(t) - QUi(t) - QPi+1(t) \quad i=2,4,6 \quad (3)$$

Równania (1),(2),(3) po scałkowaniu zdyskretyzowano z krokiem T, przyjmując stałe wartości przepływów $QPi(t - TOi)$, $QSi(t)$ między węzłami dyskretyzacji. Otrzymany w ten sposób dyskretny model symulacyjny systemu, w dalszym ciągu utożsamiano z rzeczywistym systemem:

$$QKi[(1+i)T] = e^{-T/T1i} QKi(1T) + QPi(1T - TOi) \cdot (1 - e^{-T/T1i}), i=1,3,5,7,8 \quad (4)$$

$$Vi[(1+i)T] = Vi(1T) + T \cdot QSi(1T) \quad (5)$$

$$QSi(1T) = QPi(1T) + QDi(1T) - QUi(1T) + QPi+1(1T), i=2,4,6 \quad (6)$$

$$QP9P(1T) = QK8(1T) - QU8(1T) + QD8(1T), l=0,1,2,\dots \quad (7)$$

Modele systemu używane do rozwiązania zadań sterowania retencją i przepływem otrzymano przez uproszczenie równań (4)+(7). Zwiększono krok dyskretyzacji i zaniedbano efekty gromadzenia wody na odcinkach elementarnych, sprowadzając tym samym model odcinka do czystego opóźnienia. Uwzględniono jednak fakt, że opóźnienia transportowe stanowią ułamkową część kroku dyskretyzacji. Zbudowano również proste modele pracy oczyszczalni ścieków w miastach [1].

2. Opis układu sterowania.

Układ sterowania ma trzy warstwy (rys.2), w których rozwiązuje się zadania optymalizacji nazwane odpowiednio: ZPD - zadanie planowania długoterminowego, ZPS - zadanie planowania średnioterminowego, ZPK - zadanie planowania krótkoterminowego. Za zmienne decyzyjne przyjęto zrzuty wody ze zbiorników retencyjnych QP3, QP5, QP7 i pobory wody przez miasta QU2, QU3, QU6. Zadania optymalizacji w kolejnych warstwach układu sterowania zostały sformułowane zgodnie z zasadą agregacji czasowej.

Ze względu na to, że prognoza dopływów jest dokładna jedynie na krótkim odcinku czasu, zadania te są rozwiązywane z odpowiednią dla każdej warstwy częstością zgodnie z zasadą repetycji [4].

Wprowadza się standardowe oznaczenia poszczególnych wektorów w dyskretnym modelu systemu:

$$x \triangleq [x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_9]^T \triangleq [QK1, V2, QK3, V4, V6, QP9P]^T,$$

gdzie x oznacza wektor stanu,

$$v \triangleq [v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9]^T \triangleq [QW1, QU1+QU5, QD1+QD2, QD3+QD4, QU9, \\ QW6+QD6, QD5, QU10, QD8]^T,$$

gdzie v oznacza wektor wielkości wejściowych niesterowanych,

$$u \triangleq [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6]^T \triangleq [QU2, QU3, QP3, QP5, QP7, QU8]^T,$$

gdzie u oznacza wektor sterowań.

Ze względu na wygodę realizacji obliczeń numerycznych dzielimy system na cztery podsystemy. Dla celów zadania ZPK przyjęto krok dyskretyzacji równy 1 dobie. Przy budowie modelu matematycznego pominięto stałe czasowe inercji odcinków rzek. Poniżej przedstawiono równania kolejnych podsystemów :

Podsystem 1

$$x1(k+1) = A1 \cdot x1(k) + B10 \cdot u1(k) + B11 \cdot u1(k-1) + B12 \cdot u1(k-2) + C10 \cdot v1(k) + C11 \cdot v1(k-1), \quad (8)$$

gdzie $x1 = [x_1, x_2]^T$, $u1 = [u_1, u_2, u_3]^T$, $v1 = [v_1, v_2, v_3]^T$.

Podsystem 2

$$x2(k+1) = A2 \cdot x2(k) + B20 \cdot u2(k) + B21 \cdot u2(k-1) + C20 \cdot v2(k), \quad (9)$$

gdzie $x2 = [x_3, x_4]^T$, $u2 = [u_2, u_3, u_4]^T$, $v2 = [v_4, v_5]^T$.

Podsystem 3

$$x3(k+1) = A3 \cdot x3(k) + B30 \cdot u3(k) + C30 \cdot v3(k), \quad (10)$$

gdzie $x3 = [x_6]$, $u3 = [u_5]$, $v3 = [v_6]$.

Podsystem 4

$$x4(k+1) = B40 \cdot u4(k) + B41 \cdot u4(k-1) + C40 \cdot v4(k) + C41 \cdot v4(k-1), \quad (11)$$

gdzie $x4 = [x_9]$, $u4 = [u_4, u_5, u_6]^T$, $v4 = [v_7, v_8, v_9]^T$.

W modelu dla zadania ZPS pomijamy opóźnienia transportowe odcinków rzek, które są małe w stosunku do przyjętego kroku dyskretyzacji (6 dob).

W modelu dla zadania ZPD oprócz uproszczeń przyjętych dla zadania ZPK i ZPS pomijamy opóźnienia wynikające z pracy oczyszczalni ścieków. Krok dyskretyzacji w tym zadaniu wynosi 1 miesiąc. Szczegółowe modele dla wszystkich zadań optymalizacji podane są w pracy [2].

Przytoczymy przykładowe postaci zadania ZPD :

Minimalizuj funkcjonal jakości :

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} \{ \delta_A (\widetilde{DWA} - QU2(i))^2 + \delta_B (\widetilde{DWB} - QU3(i))^2 + \delta_C (\widetilde{DWC} - QU8(i))^2 \\ + \delta_3 (QP3N - QP3(i))^2 + \delta_5 (QP5N - QP5(i))^2 + \delta_7 (QP7N - QP7(i))^2 \}, \quad (12)$$

gdzie δ_A , δ_B , δ_C , δ_3 , δ_5 , δ_7 - są współczynnikami wagowymi, a \widetilde{DWA} , \widetilde{DWB} ,

$\widetilde{DWC}, QU2, QU3, QU8, QP3, QP5, QP7$ są wyrażone w tys. m^3 /miesiąc, przy ograniczeniach wynikających z równań systemu i dodatkowo

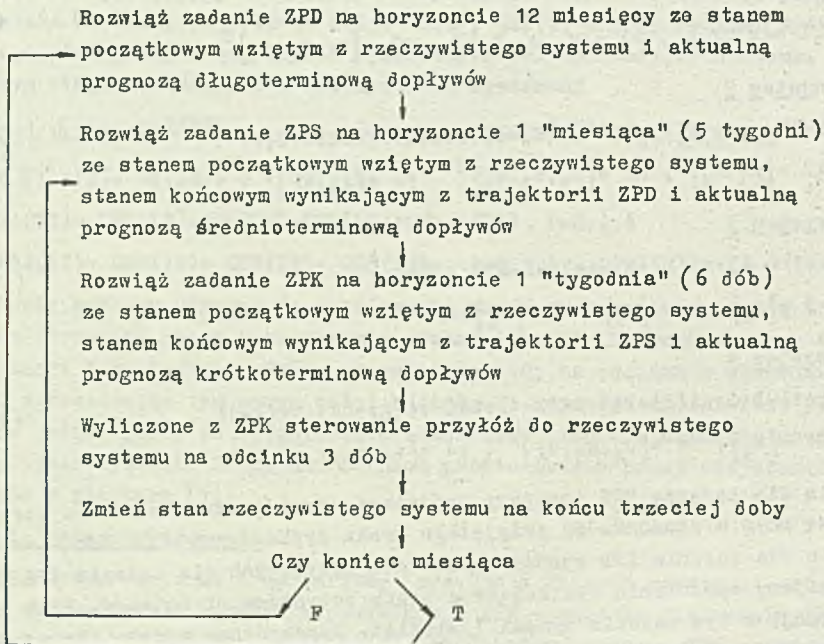
$$\begin{aligned} V2MIN \leq V2(i) \leq V2MAX, \quad V4MIN \leq V4(i) \leq V4MAX, \quad V6MIN \leq V6(i) \leq V6MAX, \quad i=1,2,\dots,N-1 \\ V2(N)=V2(0), \quad V4(N)=V4(0), \quad V6(N)=V6(0), \\ QP3MIN \leq QP3(i), \quad QP5MIN \leq QP5(i), \quad QP7MIN \leq QP7(i), \quad QP9FMIN \leq QP9P(i) \end{aligned} \quad (13)$$

$$i=0,1,\dots,N-1.$$

Zadanie ZPD jest rozwiązywane na horyzoncie o stałej długości równym 1 rok ($N=12$). Pierwsze trzy składniki funkcjonau jakości oceniają pokrycie zapotrzebowania na wodę w miastach A,B,C , pozostałe trzy składniki oceniają odchylenie od przepływów nominalnych.

Zadanie ZPS i ZPK mają analogiczną postać jak zadanie ZPD (patrz [2]). We wskaźniku jakości występują tam dodatkowe składniki, stanowiące karę za odchylenie stanu końcowego od wartości zadanej z wyższej warstwy sterowania.

Struktura układu sterowania retencją i przepływem została przedstawiona na rys.2 , a jego praca odbywa się wg następującej sieci działań.



3. Wyniki symulacji

Przeprowadzono symulację działania układu sterowania na odcinku 9 miesięcy roku hydrologicznego. Zadania optymalizacji dynamicznej ZPD, ZPS i ZPK zostały sprowadzone do zadań programowania matematycznego i rozwiązane za pomocą procedury programowania kwadratowego [3]. System rzeczywisty był symulowany wg wzorów (4)+(7) . Symulację działania układu sterowania wykonano dla roku "suchego", tj. o wyraźnie mniejszych od średniej wieloletniej wartościach dopływów. Przebiegi dopływów wykazują po 2 wyra-

żne maksima, odpowiadające wiosennej (kwiecień-maj) i letniej (sierpień) fali powodziowej.

Na rys.3 przedstawiono trajektorię stanu, tj. zapełnienia zbiorników retencyjnych V2, V4, V6. Jako punkt startowy symulacji wybrano średnie wartości zapełnienia $V_i(0) = 1/2 (V_{iMAX} + V_{iMIN})$. Przebiegi czasowe zapełnienia wynikają z wartości dopływów do systemu i przyjętego kryterium sterowania. Zapełnienia V2 i V4 dość szybko maleją do dolnej wartości granicznej i utrzymują się w jej pobliżu przez ok. 4 miesiące roku hydrologicznego. Zapełnienie V6 nie osiąga wartości granicznych ze względu na ich dużą rozpiętość. W szóstym i siódmym miesiącu hydrologicznym zbiorniki przechwytyją pierwszą falę powodziową, stąd też ich zapełnienie gwałtownie wzrasta. Malejący w dalszym ciągu przebieg zapełnienia zbiorników wynika ze zmniejszenia wartości dopływów i konieczności przygotowania zbiorników do przyjęcia drugiej fali powodziowej.

Wartości sterowań są wyliczane na podstawie krótkoterminowych prognoz dopływów do systemu. Na rys.4 przedstawiono trajektorie sterowań - poborów wody przez odbiorców w miastach A, B i C (QU2, QU3, QU8), zaś na rys.5 trajektorie zrzutów ze zbiorników retencyjnych (QP3, QP5, QP7). Wszystkie wartości sterowań zostały podane w procentach wartości pożądanych (pobory) bądź nominalnych (zrzuty). Sterowanie systemem zapewnia pokrycie zapotrzebowania na wodę odbiorców miejskich w przeważającej części roku. Silne wahania poborów QU2 i QU3 na przełomie 3. i 4. oraz 5. i 6. miesięcy hydrologicznych wynikają z długotrwałego deficytu wody w systemie (por. rys.3) i dobowych wahań dopływów do zbiorników retencyjnych. Z uwagi na to, że pobór QU8 następuje bezpośrednio z koryta rzeki, jest on pokryty w całości przez praktycznie cały horyzont sterowania. Większe od pożądanych wartości poborów QU2 i QU3 w 7. miesiącu hydrologicznym wynikają z konstrukcji funkcji celu zadania. Sytuacja taka może być niekiedy

korzystna (np. przy możliwości gromadzenia wody w zbiornikach).

Trajektorie zrzutów ze zbiorników retencyjnych (rys.5) wykazują dużą dynamikę zmian, wynikającą z przebiegów dopływów do systemu. Średnie wartości zrzutów są niższe od nominalnych (rok "suchy"), zachodzi nawet konieczność utrzymywania minimalnych ze względu na ochronę życia biologicznego wartości zrzutów (szczególnie QP3). Pojawienie się fali powodziowej zmusza do krótkotrwałego stosowania bardzo dużych zrzutów (np. zrzut QP5 w 7. miesiącu), co może być groźne z punktu widzenia ochrony przeciwpowodziowej obszaru za zbiornikiem.

Trajektorie sterowań wynikają jakościowo z roli, którą pełnią w systemie zbiorniki retencyjne. Zbiornik V2 powinien uniezależniać odbiorców w miastach A i B od silnych wahań przepływów w górnym odcinku rzeki, a ponadto wyrównywać przepływ w korycie. Zbiornik V4 jest typowym niewielkim zbiornikiem wyrównującym przepływ w korycie. Zbiornik V6 ma za zadanie zapewnienie takiego przepływu wody, aby zapotrzebowanie miasta C było całkowicie pokryte.

4. Wnioski.

Opisany układ pozwala sterować systemem retencji i przepływu bez ingerencji operatorskich. Hierarchiczna struktura sterowania wraz z repetycją umożliwiającą spełnienie stawianych układowi zadań nawet w warunkach ostrego deficytu wody. Stopień pokrycia zapotrzebowania odbiorców w miastach A i B niewiele odbiegał od 100 %, zaś w mieście C wynosił 100 %. Zapełnienie zbiorników retencyjnych mieściło się wewnątrz założonych ograniczeń bądź nieznacznie przekraczało te ograniczenia.

Używane do obliczenia sterowań prognozy dopływów wyraźnie różniły się od realizacji, szczególnie w zadaniu o długim horyzoncie (ZPD). Uzyskanie w tych warunkach opisanych wyżej rezultatów świadczy o dobrych właściwościach przyjętej struktury sterowania systemem retencji i przepływu.

LITERATURA

- [1] Raport z zadania badawczego : "Badania symulacyjne i analityczne nad koncepcją opracowaną w 1982 roku sterowania eksperymentalnym systemem wodno-gospodarczym" opracowanego w ramach tematu O1.05.01 programu PR-7. Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983.
- [2] Raport z zadania badawczego : "Opracowanie algorytmów realizujących zadania jednostek decyzyjnych poszczególnych podsystemów sterowania opracowanej w 1982 roku struktury sterowania eksperymentalnym systemem wodno-gospodarczym, przy założonych interakcjach między podsystemami" opracowanego w ramach tematu O1.05.01 programu PR-7. Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1984.
- [3] Dokumentacja użytkowa systemu programowania nieliniowego. Sprawozdanie z badań przeprowadzonych w ramach problemu I.2 "Metody i środki projektowania automatycznego", Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.
- [4] W.Findeisen, F.N.Bailey, M.Brdyś, K.Malinowski, P.Tatjewski, A.Woźniak: "Control and Coordination in Hierarchical System " John Wiley, 1980.

CONTROL OF WATER RESOURCE SYSTEM, STRUCTURE AND SIMULATION

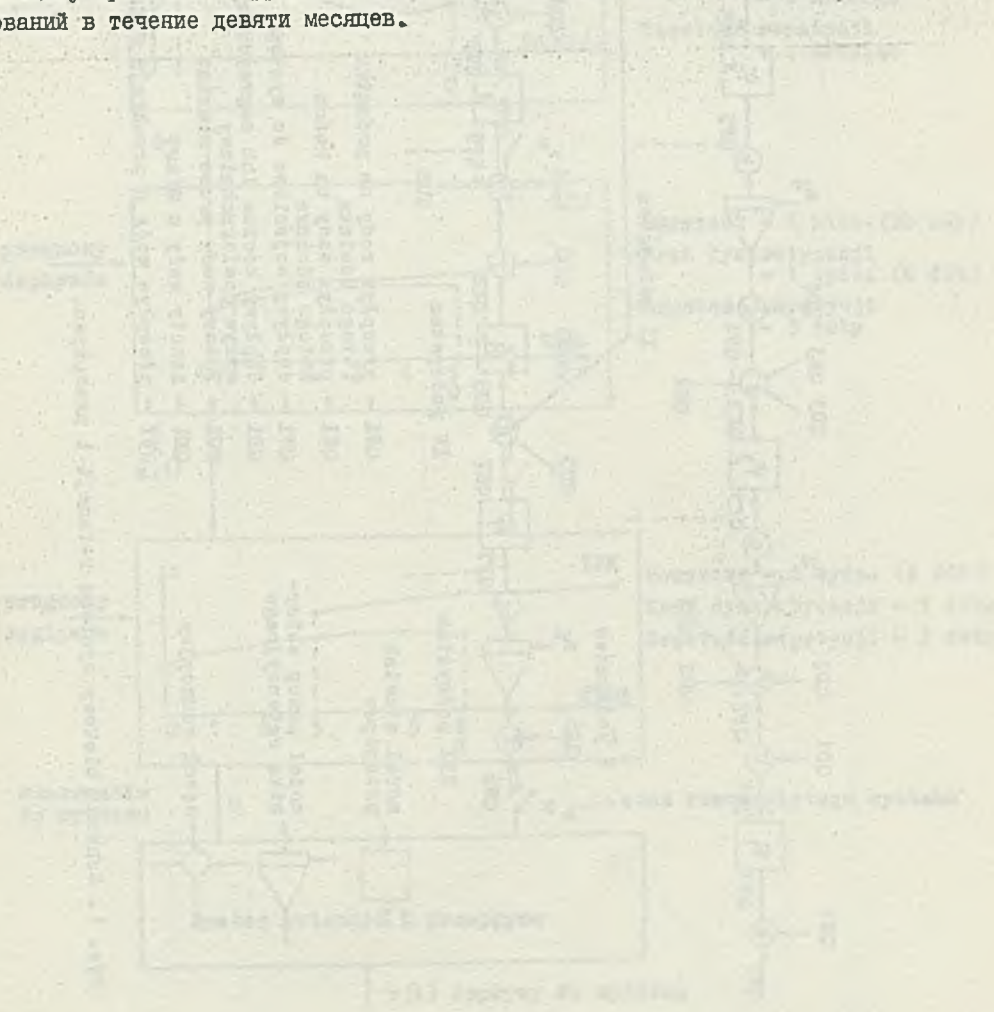
S u m m a r y

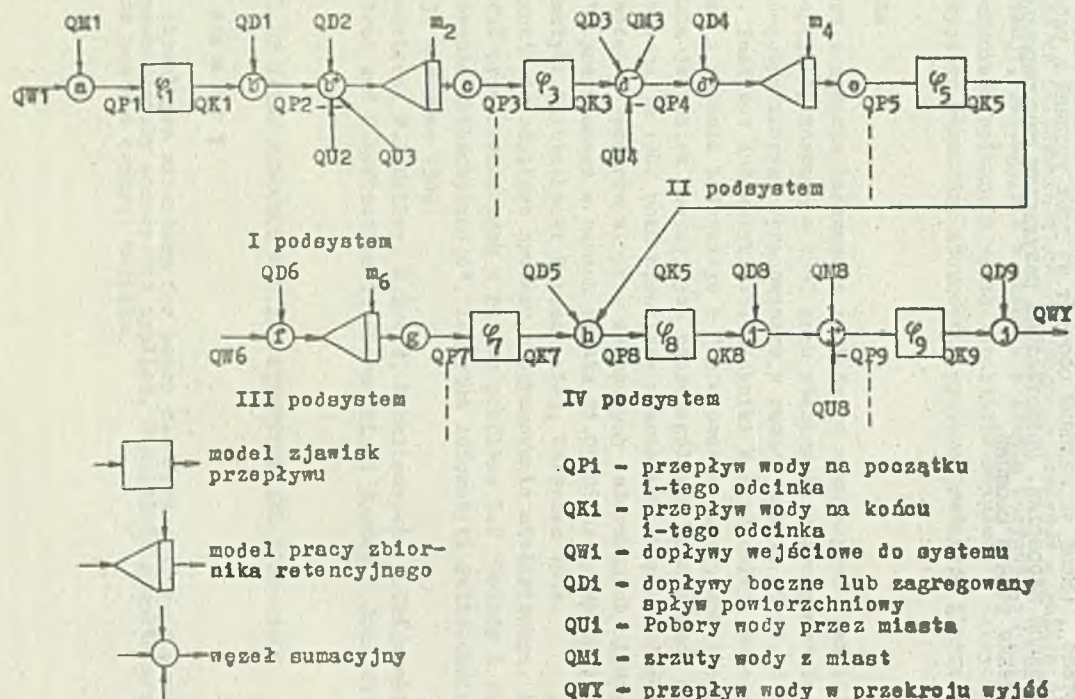
A three-layer structure for water resource system is presented. The time-hierarchy concept is applied. Simulation results are given for nine months control horizon.

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ . СХЕМА И СИМУЛЯЦИОННЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

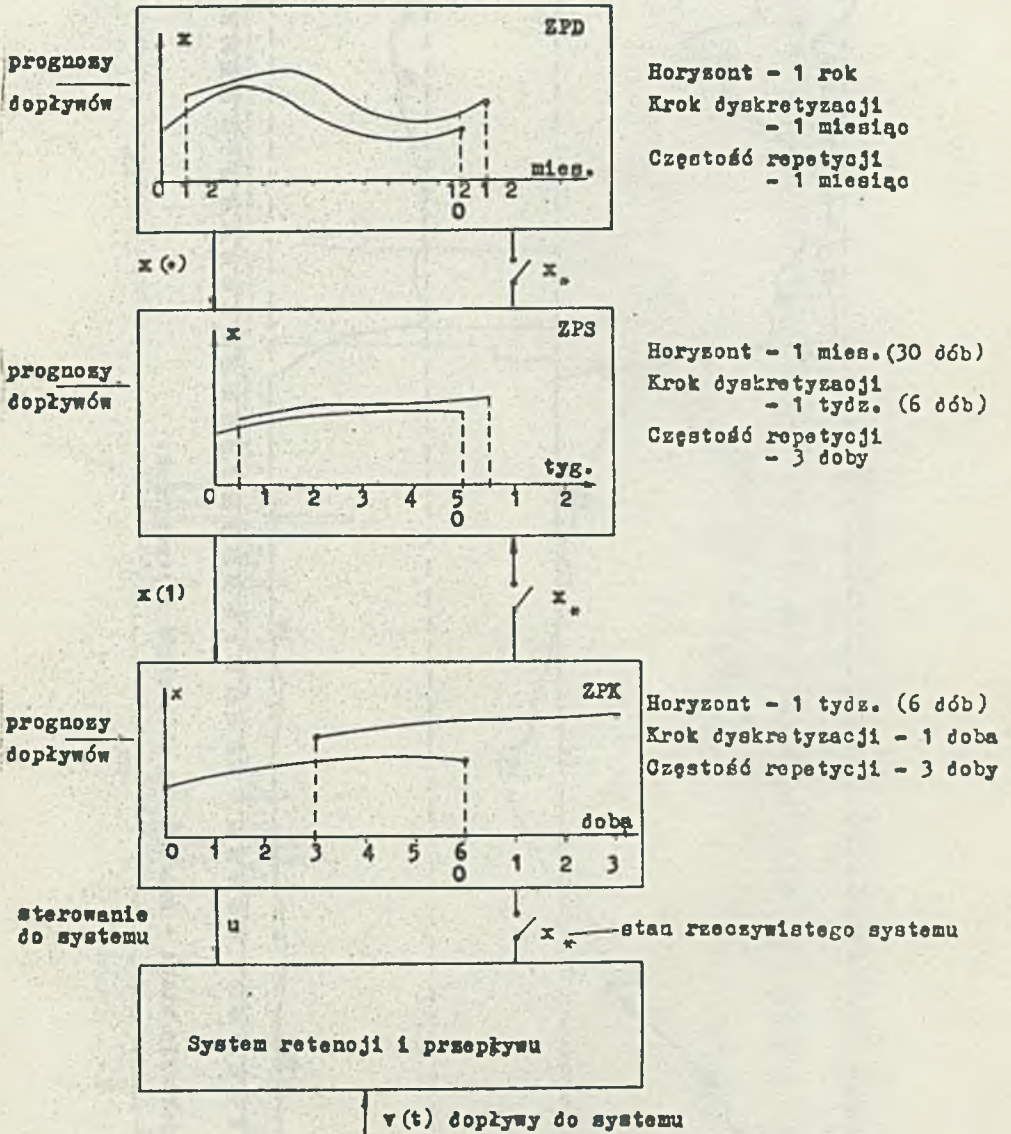
Р е з ю м е

В работе представлена схема управления водными ресурсами в водохозяйственной системе . Схема управления состоит из трёх уровней и работает по принципу временной иерархии. Представлены результаты симуляционных исследований в течение девяти месяцев.

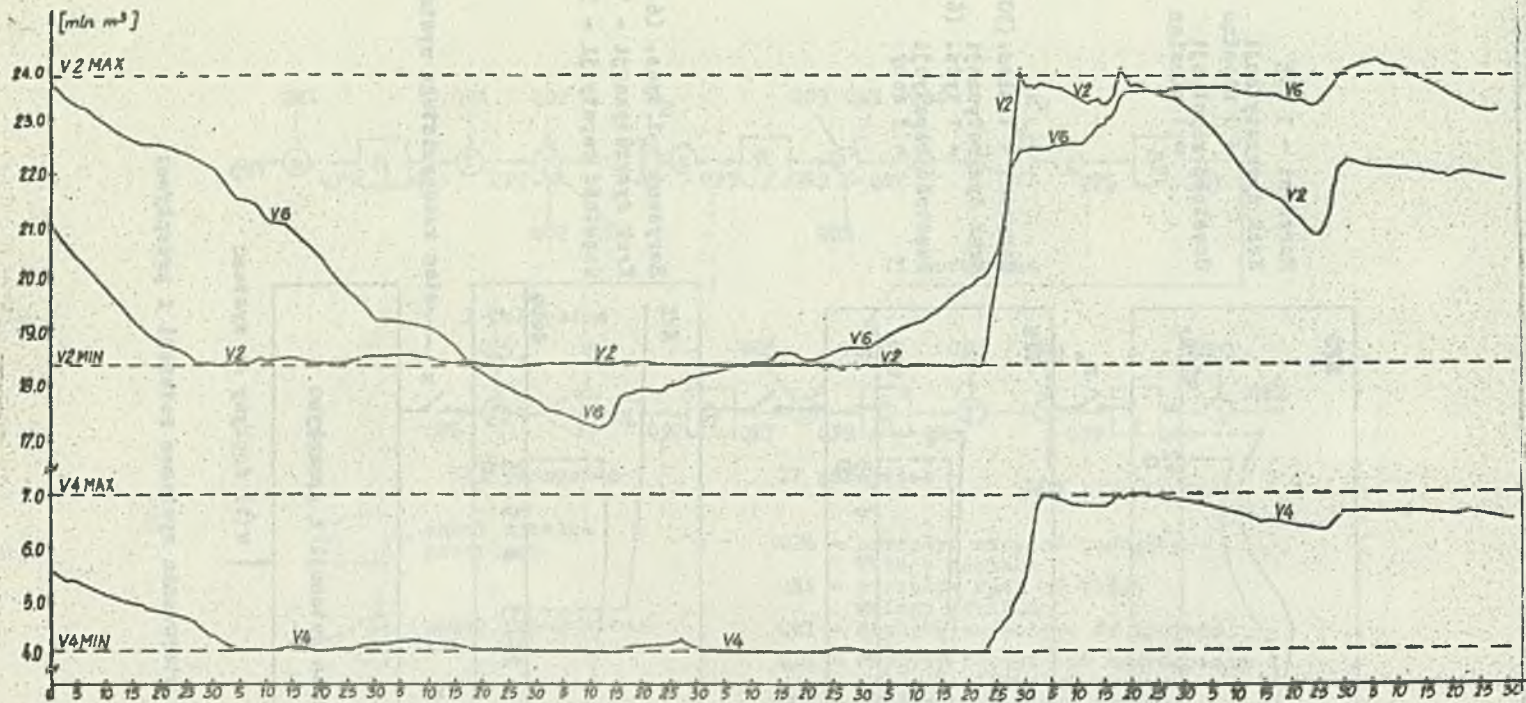




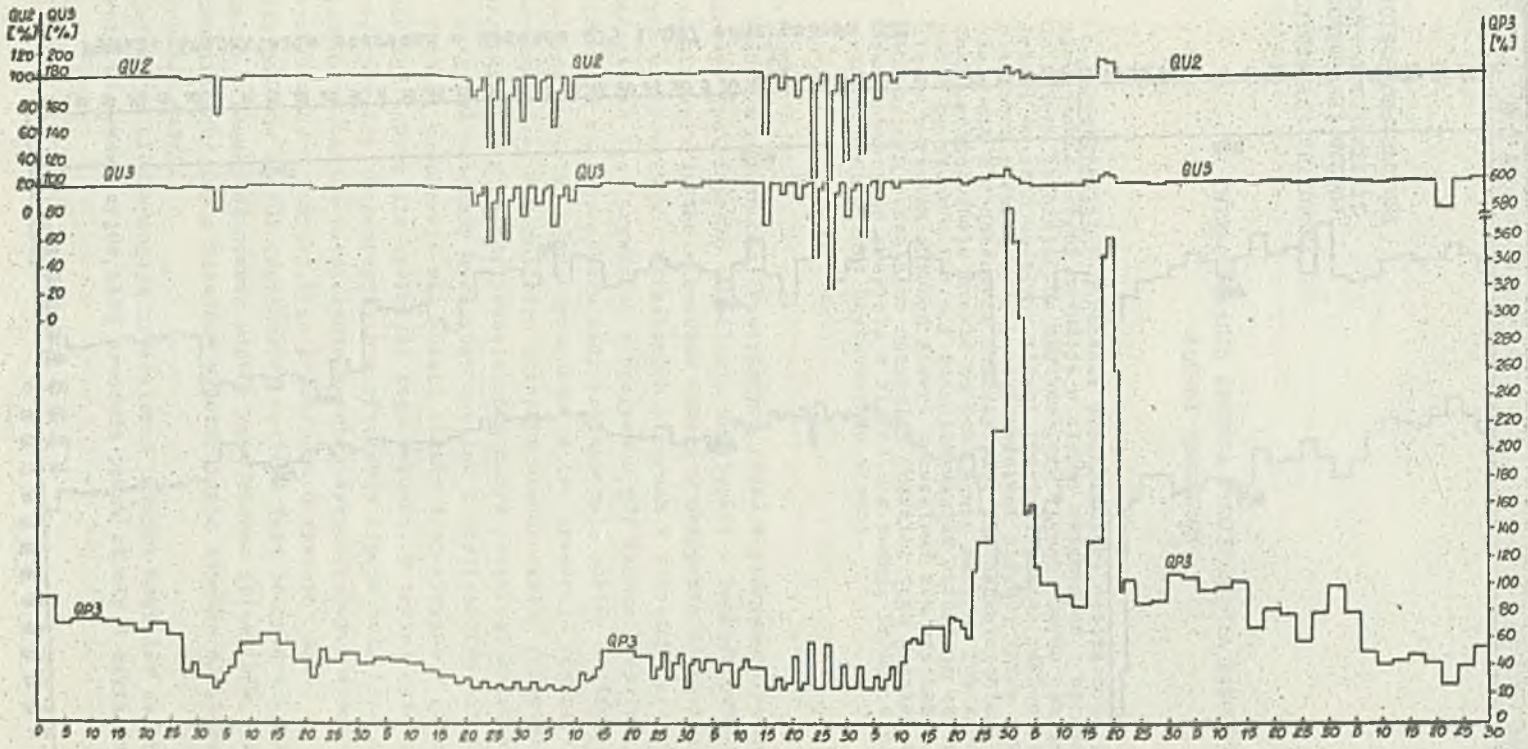
Rys. 1. Schemat blokowy systemu retencji i przepływu.



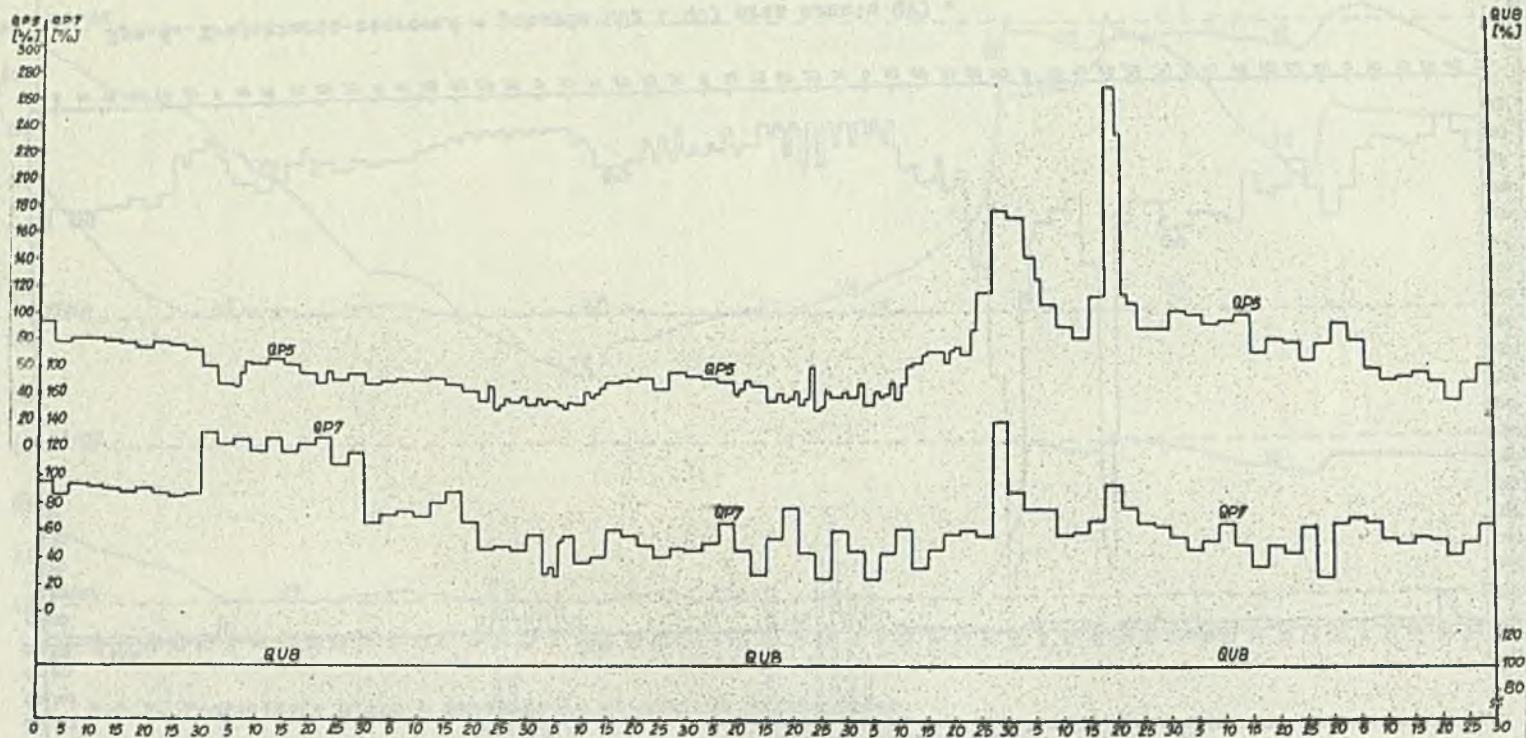
Rys.2. Układ sterowania systemem retencji i przepływu.



Rys.3. Trajektorie stanu - zabezpieczenia zbiorników retencyjnych.



Rys.4. Trajektorie sterowań - poborów QU2 i QU3 oraz wzrostu QP3 .



Rys.5. Trajektorie sterowań - rzutów QP5 i QP7 oraz poboru QUB .