

Władysław FINDEISEN, Mieczysław BRDYŚ, Bohdan FRELEK,  
Hanna MICHALSKA, Piotr TATJEWSKI, Adam WOZNIAK

Instytut Automatyki  
Politechniki Warszawskiej

## KONCEPCJA ZARZĄDZANIA I STEROWANIA W PILOTOWYM SYSTEMIE WODNO-GOSPODARCZYM

**Streszczenie.** Praca poświęcona jest przedstawieniu koncepcji zarządzania i sterowania w wybranym systemie wodno-gospodarczym. Przedstawiono matematyczny model tego systemu. Następnie sformułowano zadanie sterowania w postaci zapewniającej pożądane zachowanie się systemu. Zaproponowano i szczegółowo opisano hierarchiczny system sterowania realizujący postawione zadanie.

### 1. Wstęp

Celem niniejszej pracy jest prezentacja struktury układu zarządzania i sterowania pilotowym systemem wodno-gospodarczym (por. [1],[2]). Zadanie działania tego układu można krótko przedstawić jako pokrycie zapotrzebowań odbiorców, tak w aspekcie ilości jak i jakości dostarczonej im wody, przy równoczesnym spełnieniu ograniczeń wynikających, np. z wymagań ochrony przeciwpowodziowej czy wymagań ochrony przyrody. Ponadto, w sytuacjach gdy jest to możliwe, należy minimalizować koszty działania systemu. Proponowany system sterowania ma strukturę hierarchiczną. Jest wiele powodów takiego wyboru, szczególnie zostaną one omówione dalej. Tu warto wymienić dwa - po pierwsze, sformułowane zadanie sterowania jest zadaniem wieloskaźnikowym, po drugie istniejące stosunki prawne wywołują istnienie wielu ośrodków decyzyjnych.

Kończąc ten krótki wstęp warto zauważyć, że przedstawiony model systemu wodno-gospodarczego jest wzorowany na realiach Staropolskiego Okręgu Przemysłowego położonego wzdłuż rzeki Kamiennej. Jednak aby uniknąć nieporozumień trzeba podkreślić, że nie jest to ani uproszczony, ani żaden inny model systemu wodno-gospodarczego tego regionu.

### 2. Model systemu

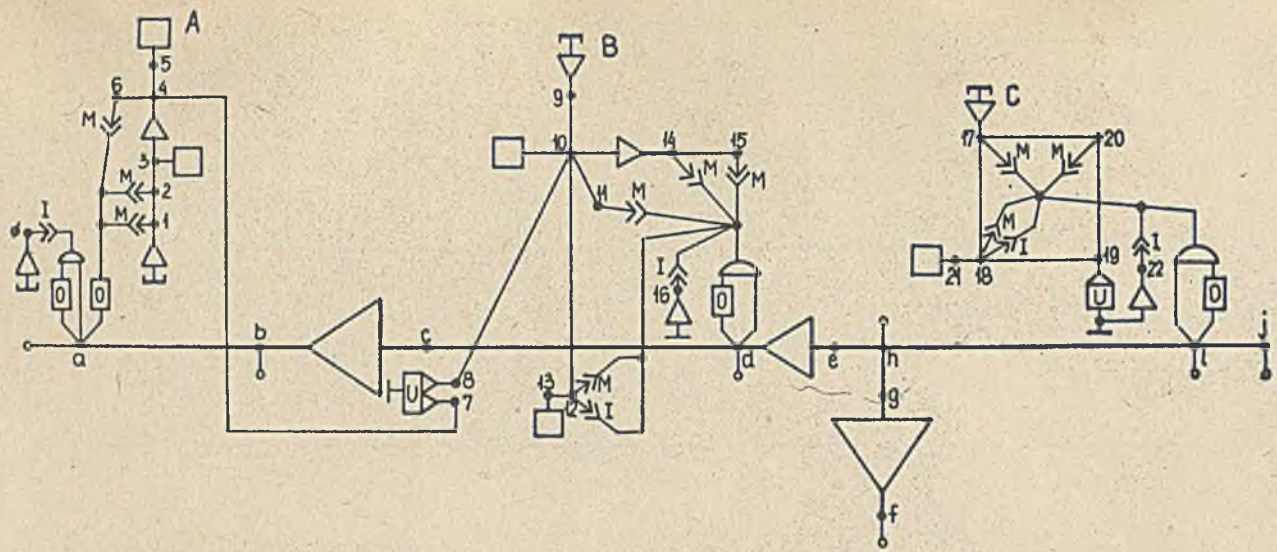
Przedmiotem naszych rozważań jest więc gospodarka wodna pewnego regionu przemysłowego położonego w dolinie rzeki. Wyróżniono w nim















trzech odbiorców wody i jednocześnie trzy punktowe źródła zanieczyszczeń - miasta A, B i C. Jak przedstawiono to na rys. 1 rzeka główna przepływa przez wszystkie miasta, posiada jeden istotny prawobrzeżny dopływ, a w regionie znajdują się trzy zbiorniki retencyjne. Przyjęto, że potrzeby użytkownikó w są zaspokajane z ujęć wód podziemnych i powierzchniowych, przy czym założono, że każde miasto pobiera wodę z rzeki i zrzuca do niej ścieki w tym samym węźle. Wobec naturalnej ograniczoności zasobów, konieczną współpracę między różnymi ujęciami zapewniają systemy wodociągowe przedstawione również na rys.1.

Zagregowany model przepływu i retencji przedstawiamy na rys.2. Składa się on z odcinków elementarnych i węzłów reprezentujących wydzielone odcinki rzeki i zbiorniki retencyjne. Na odcinkach elementarnych zachodzą procesy transportu i gromadzenia wody. Wszelkie zjawiska o charakterze "rozłożonym" jak np. spływ powierzchniowy, zostały sprowadzone do oddziaływania w węzłach jako hipotetyczne dopływy boczne. Taki sposób podejścia wymaga identyfikacji wielkości tych dopływów. Identyfikacja ta nie jest jednak zbyt trudna jeżeli dysponujemy dostateczną bazą danych. Związki między siecią wodociagową a modelem przepływu przedstawiają natężenia poboru  $Q_U$  i zrztu ścieków  $Q_M$ . Struktura sieci wodociagowej jest przedstawiona na rys.1. Składają się na nią ujęcia wody, pompownie, zbiorniki sieciowe, rurociągi oraz odbiorcy i zanieczyszczenia w poszczególnych węzłach. Jak wiadomo na jakość wody składa się wiele czynników biologicznych, chemicznych itp. Aby nie zagubić się w szczegółach przyjęliśmy dwa mierniki określające jakość: biologiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT) i związane z nim stężenie tlenu rozpuszczonego (TR). Do modelowania zmian tych wielkości wykorzystano taki sam podział rzeki jak przy modelowaniu przepływu.

Przyjęte modele poszczególnych zjawisk i elementów występujących w systemie są następujące. Na elementarnym odcinku rzeki zachodzą dwa zjawiska: transport wody i naturalna degradacja zanieczyszczeń. Pierwsze modelujemy za pomocą zmodyfikowanego równania Nasha, drugie za pomocą układu równań Streetera-Phelpsa [3]. Zbiorniki retencyjne opisujemy za pomocą równania różniczkowego wiążącego zmianę zapełnienia z dopływami i odpływami. Założono, że opróżnianie zbiorników odbywa się przez przelew zgodnie z regułą decyzyjną o kształcie przedstawionym na rys. 3, a ustalaną raz na dobę. Wobec braku prostego i wiarygodnego modelu samooczyszczania w zbiorniku, zjawisk tych nie modelowano przyjmując, że woda wypływająca ze zbiornika charakteryzuje się danym poziomem BZT i TR. Zmienne w czasie dopływy do rzeki były symulowane za pomocą modeli generacyjnych typu ARMA [1]. Elementy sieci dystrybucji są modelowane za pomocą kwadratowych aproksymacji charakterystyk odpowiednich pomp i rurociągów. Zapotrzebowanie na wodę poszczególnych odbiorców opisano za pomocą średniego zapotrzebowania dobowego i zakłóconych stochastycznie histogramów godzinowego rozbiór wody. Wyróżniono 6 typów odbiorców [4]. W sytuacji braku możliwości pokrycia zapotrzebowania w węźle, spadek poboru w stosunku do zapotrzebowania jest modelowany za

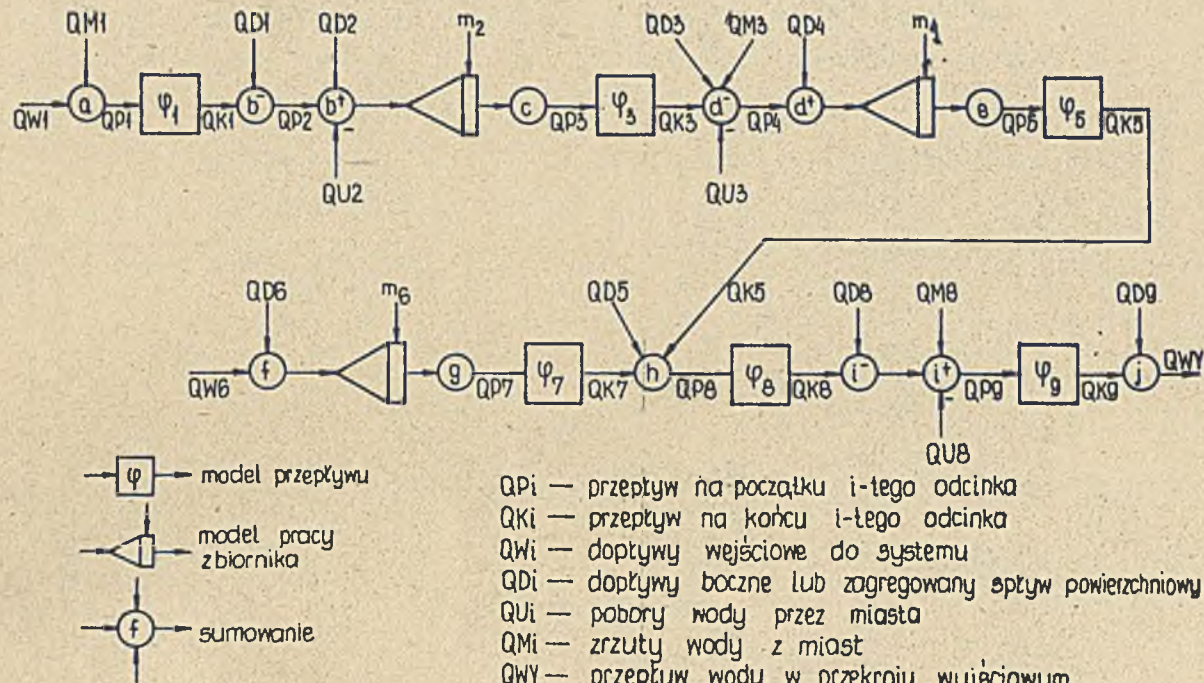


- |   |  |
|---|--|
|  odcinek rzeki         |  stacja uzdatniania   |
|  zbiornik retencyjny   |  oczyszczalnia        |
|  dopływ do rzeki       |  odcinek rurociągu    |
|  ujęcie powierzchniowe |  odbiorca komunalny   |
|  ujęcie głębinowe      |  odbiorca przemysłowy |
|  pompownia             |  |
|  zbiornik wyrównawczy  |  |

Rys. 1.

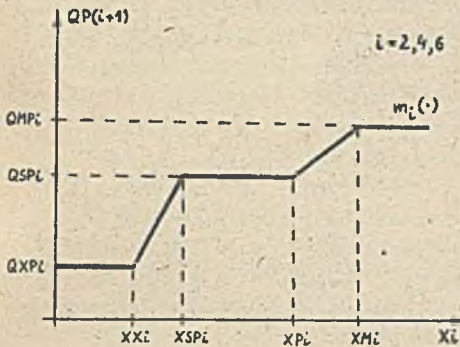
Schemat zlewni i odbiorców



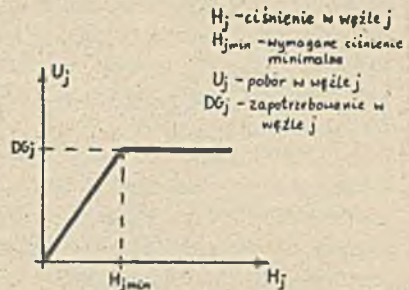


Rys.2. Zagregowany model przepływu

$QP(i+1)$  - natężenie przepływu za zbiornikiem  
 $X_i$  - zmierzony poziom lustra wody  
 $QSP_i, QMP_i, QXP_i$  - natężenia przepływu  
 charakteryzujące regułę decyzyjną,  
 $XX_i, XM_i$  - poziomy alarmowe  
 $XSP_i, XPI$  - poziomy ograniczające stan "średni"



Rys.3. Opis reguły decyzyjnej



Rys.4. Charakterystyka deficytu

pomocą charakterystyki deficytu przedstawionej na rys.4. Celem uproszczenia rozważań założono, że nie ma strat ani opóźnień w transporcie wody w sieci wodociągowej; tak więc dopływ do oczyszczalni jest sumą poborów poszczególnych odbiorców. Stężenia BZT i TR w tym dopływie są liniową kombinacją stężeń opisujących sposób zanieczyszczenia przez poszczególne odbiorców. Przy modelowaniu pracy oczyszczalni przyjęto, że pracują one cyklicznie pełną mocą, przy czym w danym cyklu pracy jest spuszczana taka ilość oczyszczanej wody o stałym, zadanym stężeniu BZT i TR, jaka dopłynęła w cyklu poprzednim.

W procesie symulacji, poszczególne równania rozwiązywano metodą Eulera (równania transportu) lub zmodyfikowaną metodą Newtona-Raphsona (równania sieci dystrybucji z charakterystykami deficytu). Równania Streetera-Phelpsa rozwiązano analitycznie wzdłuż charakterystyk.

### 3. Cele działania systemu sterowania

Przyjęto, że zadaniem systemu sterowania jest realizacja następujących celów działania.

- (1) Zrealizowanie zapotrzebowania na wodę odbiorców komunalnych i przemysłowych w miastach A, B i C.
- (2) Utrzymanie odpowiedniej czystości wody w rzece.
- (3) Spełnienie określonych wymagań ilościowych i jakościowych na wyjściu systemu (w węźle j).
- (4) Zapewnienie przepływów nienaruszalnych na odcinkach rzeki c-d, e-h oraz g-h.
- (5) Spełnienie wymagań ochrony przeciwpowodziowej dotyczących nie przekraczania chwilowych i dekadowych przepływów na odcinkach rzeki c-d, e-h oraz g-h oraz nie przekraczania maksymalnych pojemności zbiorników.



- (6) Racjonalne gospodarowanie zasobami wód podziemnych zapewnione przez chwilowe i całkowite ograniczenia poboru wody ze źródeł podziemnych.  
 (7) Minimalizacja kosztów uzysku i dystrybucji wody.

Przy takiej mnogości celów jest rzeczą konieczną ustalenie określonych priorytetów. I tak, zapewnienie przepływów nienaruszalnych, spełnienie wymagań ochrony przeciwpowodziowej oraz ograniczeń na pobór ze źródeł podziemnych uznajemy za wymagania obligatoryjne. Następnie za ważniejszą uznajemy realizację zapotrzebowania niż utrzymanie najwyższych klas czystości i spełnienie wymagań ilościowych i jakościowych na wyjściu systemu. Podobnie, koszty uzysku i dystrybucji wody można minimalizować dopiero wtedy, gdy pokryjemy zapotrzebowania użytkowników.

Po to by móc liczbowo ocenić stopień realizacji poszczególnych celów, przyjęto stosowane wskaźniki przedstawione w następujących rozdziałach. Cechą charakterystyczną tych wskaźników jest to, że nie można ich zastąpić jednym - wypadkowym. Problem sterowania jest zatem problemem wielowskaźnikowym.

Już tylko ten aspekt problemu wraz z faktem istnienia różnych priorytetów powoduje, że struktura sterowania systemem jest z natury rzeczy hierarchiczna. Innymi obiektywnie istniejącymi czynnikami, które implikują hierarchiczny charakter struktury podejmowania decyzji są stosunki prawne w systemie (istnienie spółki wodnej, różnych odbiorców wody) oraz ludzie biorący aktywny i nie dający się całkowicie wyeliminować (zautomatyzować) udział w procesie decyzyjnym. Uwzględnienie powyższych czynników w kształcie struktury podejmowania decyzji w systemie przeprowadzono w sposób intuicyjny. Nie dokonano tego w wyniku przeprowadzenia formalnej syntezy na bazie odpowiedniego sformalizowanego opisu tych czynników. Taki sposób podejścia wynika po prostu z małej skuteczności podejścia formalnego. Wynikowe decyzje (sterowania) uzyskuje się w wyniku rozwiązania odpowiednich zadań. Żadania te sformułowane pierwotnie są niemożliwe do rozwiązania za pomocą dostępnych środków obliczeniowych. Dokonuje się zatem ich dekompozycji w czasie i przestrzeni. Prowadzi to do dalszej hierarchizacji struktury sterowania i powstania warstw sterowania oraz lokalnych jednostek decyzyjnych (zob. rys.5).

Pojawiają się również nowe aspekty związane z modelowaniem. Mianowicie, poszczególni decydenci modelują te same fragmenty systemu stosownie do swoich, różnych potrzeb. Prowadzi to do różnych modeli tego samego fragmentu systemu używanych dla celów podejmowania decyzji przez różnych decydentów.

Analiza celów działania systemu prowadzi do naturalnego podziału zadania sterowania na trzy współzależne zadania: sterowania retencją wody, sterowania dystrybucją wody oraz sterowania jakością wody.



4. Sterowanie retencją

Zadanie sterowania retencją polega na bieżącym określaniu wielkości  $QP3(k)$ ,  $QP5(k)$  i  $QP7(k)$  dobowych zrzutów wody ze zbiorników, (zob. rys. 2),  $k$  oznacza numer doby, tak aby na przedziale czasu sterowania systemem równym jeden rok:

- nie przekroczyć chwilowych i dekadowych przepływów maksymalnych  $QC_{max}$ ,  $QC_{max}^D$ ,  $QE_{max}$ ,  $QE_{max}^D$ ,  $QG_{max}$  i  $QG_{max}^D$  w przekrojach rzeki c, e i g (ochrona przeciwpowodziowa),
- zachować przepływy nienaruszalne  $QC_{min}$ ,  $QE_{min}$ ,  $QG_{min}$ ,  $QI_{min}$  w przekrojach rzeki c, e, g oraz i<sup>-</sup>,
- nie przekroczyć zapewnień granicznych  $V2_{min}$ ,  $V4_{min}$ ,  $V6_{min}$  (ochrona życia biologicznego w zbiornikach) i  $V2_{max}$ ,  $V4_{max}$ ,  $V6_{max}$  (ochrona przeciwpowodziowa) w zbiornikach,
- zminimalizować straty wynikłe z braku pokrycia zapotrzebowania na wodę  $DW2(k)$ ,  $DW3(k)$  i  $DW8(k)$  w ujęciu powierzchniowym na zbiorniku b-c i w ujęciach powierzchniowych na rzece - węzły d oraz i (zob. rys. 1 i rys. 2).

Jak widać sformułowanie powyższe uwzględnia wymagania celów (1), (3), (4) i (5) przetłumaczone na język problemu sterowania retencją.

Zadanie sterowania retencją formułujemy w sposób następujący

$$\text{minimalizuj } \sum_{k=1}^{365} f_1(DW2(k)-QU2(k)) + f_2(DW3(k)-QU3(k)) + f_3(DW8(k)-QU8(k)) \quad (1)$$

gdzie  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$  są funkcjami strat,  $QU2(k)$ ,  $QU3(k)$  i  $QU8(k)$  są realizowanymi w odpowiednich ujęciach poborami wody w  $k$ -tej dobie, natomiast  $DW2(k)$ ,  $DW3(k)$  i  $DW8(k)$  są wielkościami zapotrzebowań miast na wodę pobieraną z tych ujęć, przy ograniczeniach

$$\begin{aligned} QC_{min} &\leq QP3(k) \leq QC_{max}; \\ QE_{min} &\leq QP5(k) \leq QE_{max}; \\ QG_{min} &\leq QP7(k) \leq QG_{max}; \\ QI_{min} &\leq QP9(k) \quad \text{dla } k=1,2,\dots,365 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^{10} QP3(1+n) \leq QC_{max}^D; \quad n = *k \text{ dla dekady}$$

$$\sum_{n=1}^{10} QP5(1+n) \leq QE_{max}^D; \quad 1 - \text{zmiana dekady}$$

$$\sum_{n=1}^{10} QP7(1+n) \leq QG_{max}^D, \quad \text{dla } l=0,10,20,\dots, (3)$$

$$\begin{aligned} V2_{min} &\leq V2(k) \leq V2_{max}; \\ V4_{min} &\leq V4(k) \leq V4_{max}; \\ V6_{min} &\leq V6(k) \leq V6_{max}; \quad \text{dla } k=1,2,\dots,365, (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V2(k+1) &= V2(k) + QP2(k) + QD2(k) - QU2(k) - QP3(k) \\ V4(k+1) &= V4(k) + QP4(k) + QD4(k) - QP5(k), \\ V6(k+1) &= V6(k) + QP6(k) + QD6(k) - QP7(k), \text{ r. zbiorników} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 QP4(k) &= QK3(k) + QD3(k) + QM3(k) - QU3(k), \\
 QK3(k+1) &= \psi_3(QK3(k), QP3(k-T03)), \\
 QP8(k) &= QK5(k) + QK7(k) + QD5(k), \\
 QK5(k+1) &= \psi_5(QK5(k), QP5(k-T05)), \\
 QK7(k+1) &= \psi_7(QK7(k), QP7(k-T07)), \\
 QK8(k+1) &= \psi_8(QK8(k), QP8(k-T08)), \\
 QP9(k) &= QK8(k) + QD8(k) + QM8(k) - QU8(k),
 \end{aligned} \tag{6}$$

gdzie zapełnienia  $V2(1)$ ,  $V4(1)$  i  $V6(1)$  wynikają z pomiaru, a  $V2(365)$ ,  $V4(365)$ ,  $V6(365)$  są zadane i wynikają z danych historycznych.

Dopływy  $QP2$ ,  $QD2$ ,  $QD3$ ,  $QD4$ ,  $QD5$ ,  $QD8$  i  $QW6$ , zapotrzebowania  $DW2$ ,  $DW3$  i  $DW8$ , oraz zrzuty  $QM3$  i  $QM8$  nie są dokładnie znane w chwili początkowej  $k=1$ .

Konsekwencją braku dokładnej znajomości tych wielkości jest niepewność rozważanego problemu decyzyjnego. Pociąga to za sobą brak możliwości dokładnego rozwiązywania zadania (1)-(6). Ponieważ prognozy w systemach wodnych są stosunkowo dokładne tylko na krótkim horyzoncie czasowym, to aby zmniejszyć wpływ niepewności proponowany system sterowania retencją wyposażono w repetycyjny mechanizm sprzężenia zwrotnego od systemu wodnego do jednostek decyzyjnych [5], [6]. Mechanizm ten oparty jest na uaktualnianych na bieżąco prognozach  $Q\tilde{P}2$ ,  $Q\tilde{D}2$ ,  $Q\tilde{D}3$ ,  $Q\tilde{D}4$ ,  $Q\tilde{D}5$ ,  $Q\tilde{D}8$ ,  $Q\tilde{W}6$ ,  $D\tilde{W}2$ ,  $D\tilde{W}3$ ,  $D\tilde{W}8$ ,  $Q\tilde{M}3$ ,  $Q\tilde{M}8$  oraz na bieżących pomiarach zapełnień zbiorników. O ile prognozowanie dopływów jest zagadnieniem dobrze opracowanym w literaturze (por. np. [7], [8]), to prognozowanie poborów i zrzutów użytkowników nie jest zadaniem typowym. Wynika to z faktu, że trudno wyobrazić sobie skuteczny sposób przewidywania zmian tych wielkości bez znajomości modelu sieci dystrybucji wraz z ich układami sterowania. Powinny to być rzecz jasna modele uproszczone w porównaniu z tymi, które są wymagane do budowy układów sterowania sieciami.

Wobec dużej ilości zmiennych i długości horyzontu czasowego, aby uzyskać efektywne algorytmy sterowania, zadanie (1)-(6) zastąpimy trzema mniejszymi zadaniami w odpowiedni sposób powiązаныmi ze sobą. Zadania te określimy posługując się metodą dekompozycji czasowej (por. np. [9], [10]). I tak, otrzymamy zadanie planowania na długim horyzoncie (ZPD) polegające na minimalizacji wskaźnika (1) na horyzoncie rocznym, przy czym wartości zmiennych odniesione są do miesiąca. Zadanie to jest następujące

$$\text{minimalizuj } \sum_{k=1}^{12} f_1(D\tilde{W}2(k) - QU2(k)) + f_2(D\tilde{W}3(k) - QU3(k)) + f_3(D\tilde{W}8(k) - QU8(k))$$

przy ograniczeniach (2'), (3'), (4), (5), (6), gdzie ograniczenia (2') i (3') powstały przez odpowiednie sumowanie ograniczeń (2) i (3). Uzyskane w ten sposób zapełnienia zbiorników na początku każdego miesiąca wykorzystywane są w zadaniu planowania na średnim horyzoncie (ZPS). W ZPS wartości zmiennych odniesionych do dekady dobierane są w oparciu o formuły analogiczne do przedstawionych w ZPD, przy czym rozważany horyzont jest skrócony do miesiąca. Narzucenie w ZPS wymagania



otrzymania na końcu miesiąca zapełnień zbiorników równych wyliczonym przez ZPD zapewnia niezbędną zgodność między obu zadaniami. Zapełnienia początkowe dla obu zadań są brane z aktualnych pomiarów, a rozwiązywanie obu zadań jest powtarzane zgodnie z typowym mechanizmem repetycyjnym.

Otrzymane w wyniku działania powyższej procedury zapełnienia zbiorników i przepływ QP4 są wykorzystywane w zadaniu planowania na krótkim horyzoncie (ZPK). Horyzontem tego zadania jest dekada, a wartości zmiennych odniesione są do jednego dnia. Rozwiązanie tego zadania wyznacza wielkości dziennych zrzutów ze zbiorników. Ze względu na koszt przesyłania informacji ZPK powinno zostać zdekomponowane. Proponowana dekompozycja polega na zastąpieniu rzeczywistego połączenia zbiorników odcinkiem rzeki o-d przez "przewidywany" przez ZPS przepływ QP4. Umożliwia to poszukiwanie zdecentralizowanych reguł decyzyjnych

$$QP3(k) = m_2(V2(k)),$$

$$QP5(k) = m_4(V4(k), V6(k)), \quad QP7(k) = m_6(V4(k), V6(k)).$$

Zauważmy, że wiedza i doświadczenie operatora zbiornika mogą zostać wykorzystane do uproszczenia wyznaczania powyższych reguł. A mianowicie, zamiast rozpatrywać zbiór wszystkich reguł potencjalnie możliwych, wystarczy analizować wybraną klasę, w której dobieramy parametry. Jest to jeden z głównych powodów dla którego w ZPK zamiast określać wielkość zrzutów dobowych określamy regułę decyzyjną. I tak przykładowo dla zbiornika b-c taka parametryczna reguła decyzyjna  $m_2(\cdot) = \bar{m}_2(\cdot, \alpha_2)$  jest otrzymywana jako rozwiązanie zadania ZPK1

$$\text{minimalizuj}_{\alpha_2} \sum_{k=1}^{1+9} f_1(\tilde{D}\tilde{W}2(k) - Q\tilde{U}2(k))$$

przy ograniczeniach

$$Q\tilde{C}_{\min} \leq \bar{m}_2(V2(k), \alpha_2) \leq Q\tilde{C}_{\max}, \quad V2_{\min} \leq V2(k) \leq V2_{\max},$$

$$\sum_{k=1}^{1+9} \bar{m}_2(V2(k), \alpha_2) \leq Q\tilde{C}_{\max}^D$$

$$k=1$$

$$V2(k+1) = V2(k) + Q\tilde{P}2(k) + Q\tilde{D}2(k) - Q\tilde{U}2(k) - \bar{m}_2(V2(k), \alpha_2),$$

$$k=1, 1+1, \dots, 1+9,$$

gdzie  $V2(1)$  jest zapełnieniem zbiornika na początku doby 1 (pomiar bieżący) a  $V2(1+9)$  jest zapełnieniem wyliczonym przez ZPS. Zauważmy, że rozwiązania ZPK1 - otrzymane reguły decyzyjne - nie zależą od czasu na przedziale całej dekady, co prowadzi do znacznego uproszczenia ich wyznaczania.

##### 5. Sterowanie dystrybucją wody

Układy sterowania sieciami dystrybucji (USD) dla miast A, B i C są częścią składową układu sterowania rozpatrywanym systemem wodno-gospodarczym. W konsekwencji muszą być one powiązane z innymi elementami tego układu. Powiązania te są dwójakiego rodzaju. Z jednej strony USD zbierają dane dotyczące zapotrzebowań i przesyłają je wyższym warstwom układu

sterowania na których są potrzebne do określania średnio- i długoterminowych prognoz zapotrzebowania, jak już wspomniano niezbędnych do efektywnego określania polityki retencji. Z drugiej strony układy nadrzędne ustalają takie warunki działania USD, które zapewniają harmonijne współdziałanie tych układów z pozostałymi. Warunkami tymi są:

**Cele działania:** zapewnienie maksymalnego możliwego pokrycia zapotrzebowań odbiorców przy minimalnych kosztach uzdatniania i dystrybucji wody.

**Ograniczenia:** Maksymalne pobory wody w ujęciach na zbiorniku retencyjnym, rzece oraz w ujęciach wód podziemnych (ograniczenia chwilowe i/lub całkowite).

Zauważmy, że istotnymi ograniczeniami wpływającymi na sposób działania USD są ograniczenia dobowego poboru wody ze zbiornika b-c (dla sieci miast A i B) oraz z ujęcia w węźle i (dla miasta C). Powyższe ograniczenia zależą od aktualnego zapełnienia zbiornika i przepływu w rzece, są więc zmienne w czasie. W konsekwencji system może pracować w dwu stanach - normalnym, kiedy można pokryć zapotrzebowanie i w sytuacji gdy występuje deficyt wody. Zmiennymi decyzyjnymi dla USD są ilość włączonych pomp MPj w j-tej pompowni i, w sytuacji deficytu, ograniczenia  $L_j$  poborów odbiorców przemysłowych. Przyjęto, że MPj może się zmieniać co godzinę, natomiast limity  $L_j$  są ustalane raz na dobę.

Już nawet pobieżne zapoznanie się ze strukturą sieci wodociągowej przedstawionej na rys. 1 uprawnia do wyciągnięcia wniosku, że sterowanie siecią miast A i B powinno być prowadzone przez jeden układ - USDAB, natomiast miasto C powinno mieć swój układ - USDC. Dokładna analiza [2], potwierdziła ten wniosek i doprowadziła do określenia następującego algorytmu podejmowania decyzji.

1<sup>o</sup> Na początku każdego dnia USDAB (USDC) określa, w oparciu o posiadaną informację, m.in. prognozy zapotrzebowań, meteorologiczne dane historyczne, zmierzony poziom w zbiorniku b-c (przepływ w węźle i), prognozę zmian tego poziomu (przepływu). Następnie określa prognozę aktywności w ciągu najbliższych 7 dni ograniczenia maksymalnego poboru wody w ujęciach powierzchniowych. W oparciu o tę prognozę zostaje zdecydowane czy występuje sytuacja normalna, czy zagrożenie deficytem.

2<sup>o</sup> **Sytuacja normalna**. W tej sytuacji jest rozwiązywane następujące dyskretne zadanie o horyzoncie 24 godzin

$$\text{minimalizuj } \sum_{k=1}^{24} \sum_{j=1}^m c_j(\text{MP}_j(k), X(k)) \quad (7)$$

przy ograniczeniach: fizycznych-wynikających z równań elementów sieci (pompowni, rurociągów, zbiorników sieciowych), strukturalnych - związanych ze strukturą sieci, oraz wymaganiach wynikających z prognozowanych wielkości zapotrzebowań odbiorców. Funkcje  $c_j$  opisują koszty uzdatniania i pompowania j-tej pompowni,  $X(k)$  to stan sieci zależny od sterowań i poborów. Początkowe zapełnienia zbiorników  $H_j(1)$  są brane z aktualnych pomiarów, natomiast zapełnienia końcowe  $H_j(24)$  są



narzucone i równe stanom dyspozycyjnym. Otrzymane w wyniku rozwiązania tego zadania sterowania są, po akceptacji i ewentualnej korekcji przez operatora, realizowane w systemie. Po upływie 24 godzin krok 1<sup>o</sup> jest powtarzany.

3<sup>o</sup> Sytuacja zagrożenia deficytem. W takiej sytuacji rozwiązywane jest dyskretne zadanie o horyzoncie 7 dni i wartościach zmiennych odniesionych do jednego dnia

$$\text{minimalizuj } \sum_{l=1}^7 d(\bar{L}(l), \bar{H}_j(l-1), DDG(l), G(l)) \quad (8)$$

$$\bar{L}(l), \bar{H}_j(l)$$

gdzie  $\bar{L}(l)$  oznacza zagregowane ograniczenie poboru dla odbiorców przemysłowych,  $\bar{H}_j(l)$  zapełnienie zbiorników na końcu l-tej doby ( $\bar{H}_j(0)$  wynika z pomiaru),  $DDG(l)$  zagregowane dzienne zapotrzebowanie,  $G(l)$  maksymalną dostępną ilość wody. Funkcja  $d(\cdot)$  to łączne koszty dystrybucji i deficytów. Rozwiązanie zadania (8) daje siedmiodniowy ciąg zmiennych  $\bar{L}(l)$  i  $\bar{H}_j(l)$ . Do wyznaczenia sterowań w danym dniu wykorzystamy tylko  $\bar{L}(1)$  i  $\bar{H}_j(1)$  wstawiając te wartości do zadania podobnego do (7)

$$\text{minimalizuj } \sum_{k=1}^{24} \left( \sum_{j=1}^m c_j(MP_j(k), X(k)) + \sum_{i=1}^n d_i(MP_i(k), X(k)) \right) \quad (9)$$

$$MP_j(k)$$

przy ograniczeniach jak w zadaniu (7) uwzględniających charakterystyki deficytu (np. takie jak na rys.4). Funkcje  $d_j(\cdot)$  to koszty deficytu u użytkowników. Końcowe zapełnienie zbiorników  $H_j(24)$  przyjmuje się równe zapełnieniu  $\bar{H}_j(1)$ . Otrzymane w ten sposób sterowania, po akceptacji przez operatora są realizowane. Po upływie 24 godzin krok 1<sup>o</sup> jest powtarzany.

Przedstawiony algorytm sterowania jest algorytmem repetycyjnym, w którym posługujemy się trzema rodzajami modeli systemu dystrybucji. W kroku pierwszym określamy rodzaj sytuacji w której znajduje się system. Jest to bardzo ważne, ponieważ w sytuacji normalnej zadanie sterowania może być traktowane jako okresowe z okresem 24 godzinnym, co prowadzi do istotnego skrócenia horyzontu zadania. Otrzymane w takiej sytuacji zadanie (7) jest zadaniem typowym dla sterowania takimi sieciami, por. np. [11],[12]. Warto jednak podkreślić, że jest to zadanie nieliniowe (kwadratowe charakterystyki elementów), a więc znalezienie jego rozwiązania nie jest rzeczą łatwą. Następnym krokiem analizy winno więc być zbadanie możliwości jego uproszczenia, szczególnie dla sieci o wielu zbiornikach. Przypadek zagrożenia deficytem jest o wiele trudniejszy, dlatego wybrano dwupoziomowy, repetycyjny sposób rozwiązywania zadań określonych dla tej sytuacji. Zauważmy, że zadanie (9) jest bardziej skomplikowane niż zadanie (7), ponieważ trzeba w nim uwzględnić istotnie nieliniowe charakterystyki deficytu u odbiorców. Dążenie do uproszczenia tego zadania jest więc w tym przypadku jeszcze bardziej uzasadnione.



## 6. Sterowanie jakością wody

Zajmując się zagadnieniem sterowania jakością musimy rozważyć następujące aspekty: określić ilościowe i jakościowe mierniki jakości wody; ustalić czynniki wpływające na jakość; zbudować modele matematyczne pozwalające przewidywać jakość; poznać, a następnie wybrać cele, sposoby i narzędzia sterowania jakością; w oparciu o posiadane modele i możliwości pomiarowe zaprojektować system sterowania jakością.

Jak pamiętamy, w celu zmodelowania przepływu i zmian jakości rzeka i jej dopływ została podzielona na 9 odcinków (por. rys.2), a BZT i TR zostały wybrane jako mierniki jakości wody. Przyjmujemy, że jakość wody na odcinku jest mierzona za pomocą tzw. klas czystości. Ich definicja jest następująca. Woda na odcinku  $[0, L]$  w przedziale czasu  $T$  (nie dłuższym niż miesiąc) znajduje się w klasie 1 (2)(3) jeżeli istnieje taki podzbiór  $\tau$  zbioru  $T$ , że dla każdego  $t \in \tau$  stężenia BZT i TR spełniają następujące nierówności:  $BZT(0, T) \leq 5(9)(17) \text{ mg/l}$ ,  $\max_{x \in [0, L]} DT(x, t)/TN(t) \leq 0.4(0.6)(0.9)$ , gdzie  $DT(x, t) = TN(t) - TR(x, t)$ ,  $TN$  oznacza nasycające stężenie tlenu oraz miara  $\tau$ /miara  $T = 0.95$ . W sytuacji gdy nie można zachować 3 klasy posługujemy się pojęciem granicznego stężenia deficytu tlenu

$$GDT = \min_{T \in P(T)} \max_{t \in \tau} \max_{x \in [0, L]} (DT(x, t)/TN(t))$$

gdzie  $P(T)$  oznacza zbiór wszystkich podzbiorów zbioru  $T$ .

Posługując się powyższymi definicjami za cel działania układów sterowania jakością (USJ) przyjmujemy zapewnienie na odcinku a-b 3 klasy, c-d, e-h, h-1 2 klasy i g-h 1 klasy czystości. Odcinek i-j położony poniżej miasta C jest bardzo zanieczyszczony, tak że realizowalnym celem może być minimalizacja GDT w węźle j.

Jak pamiętamy przyjęliśmy że wszystkie oczyszczalnie w rozważanym systemie pracują cyklicznie pełną mocą. W konsekwencji objętość, chwila początku spuszczenia oczyszczonych ścieków, czas trwania spuszczenia, oraz wielkość zrzutów ze zbiorników retencyjnych są jedynymi dostępnymi sterowaniami wpływającymi na jakość wody. Ponieważ, jak dotąd, brak użytecznych z punktu widzenia sterowania modeli samooczyszczania w zbiorniku, w przedstawionych rozważaniach musiano się ograniczyć do sterowania jakością na odcinku a-b i w węźle j.

Na system sterowania jakością składają się układy sterowania jakością w mieście A (USJA) i w mieście C (USJC). Najpierw przedstawimy algorytm działania USJA. Przyjmujemy, że decyzje o przebiegu zrzutu z oczyszczalni w mieście A są podejmowane raz na dobę. W konsekwencji na początku każdego dnia, w oparciu o zebraną informację (objętość ścieków  $VS_1$ , które dopłynęły do oczyszczalni w dniu poprzednim, stężenia BZT i TR w oczyszczonych ściekach, prognozy przepływu oraz stężeń BZT i TR w dopływie do węzła a oraz boczniku oczyszczalni) USJA określa chwilę początku spuszczenia  $t_1$  oraz czas trwania  $\Delta$ . Spuszczenie odbywa się ze stałym natężeniem  $QSP_1 = VS_1/\Delta$ . Wyznaczenie wartości  $t_1$  oraz  $\Delta$  dokonywane jest przez algorytm wykorzystujący równania bilansowe



do wyznaczenia BZT (a,.) (przebieg zmian w czasie BZT na początku odcinka a-b) i równania Streetera -Phelpsa do wyznaczenia  $DT(.,t), t \in T$  (przebiegi zmian DT wzdłuż rzeki w wybranych chwilach czasu). Celem działania algorytmu jest znalezienie takich  $t_1$  oraz  $\Delta$ , że woda na odcinku a-b będzie należeć do 3 klasy. Jeżeli osiągnięcie tego celu nie jest możliwe, algorytm minimalizuje GDT. Jako wynik otrzymujemy zbiór sterowań spełniających postawione cele. Zbiór ten jest przedstawiany operatorowi, który wybiera z niego wartości sterowań, które będą realizowane.

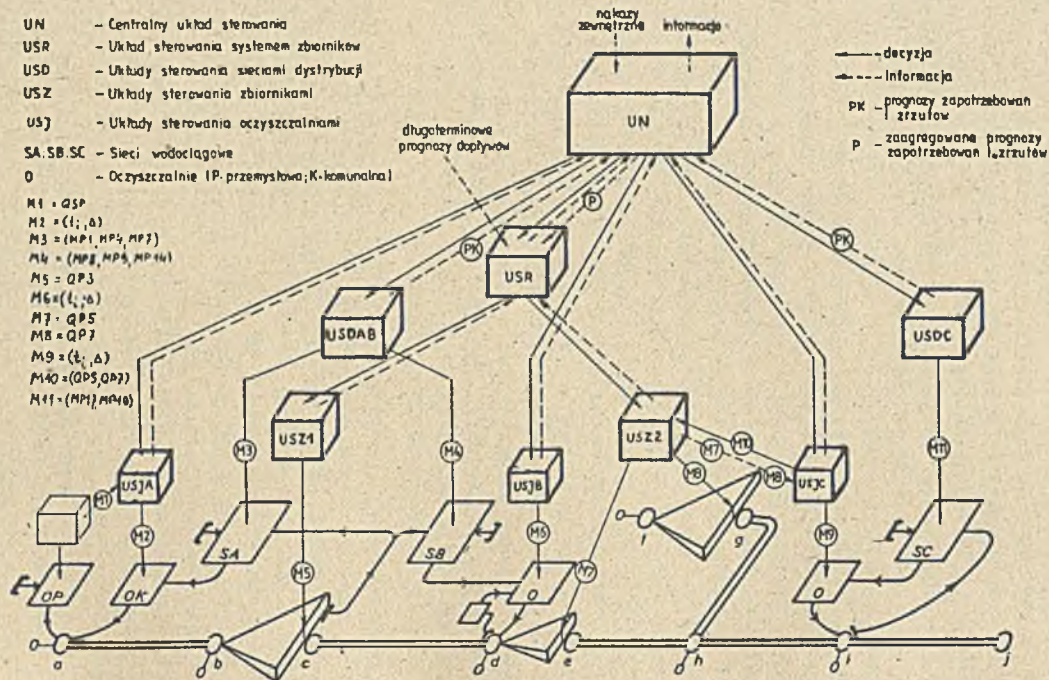
Zadanie USJC zostało określone jako minimalizacja GDT w węźle j w oparciu o współpracę zbiorników d-e i f-g oraz oczyszczalni w C. Przyjmujemy, że objętości wody, które mają być spuszczone ze zbiorników w ciągu doby są znane (są ustalone przez operatora zbiorników), natomiast natężenie wypływu tej wody może być ustalane zgodnie z potrzebami USJC. W tej sytuacji sterowaniami pozostającymi w dyspozycji USJC są natężenia  $QP5(.)$  i  $QP7(.)$  zrzutów wody (zmieniane 2 razy na dobę) oraz chwila  $t_1$  i czas trwania  $\Delta$  spuszczenia ścieków z oczyszczalni w C. Bezpośrednie posłużenie się GSD w tym przypadku może być bardzo trudne, ponieważ do określenia tego stężenia trzeba dokonać minimalizacji na zbiorze  $P(T)$ . Dlatego w algorytmie działania USJC zamiast GDT posługujemy się wskaźnikiem uproszczonym:  $LDTK9(\dots) = \max_{t \in T} (DTK9(t, \dots) / TN(t))$ , który minimalizujemy. Potrzebna do wyznaczenia tego wskaźnika relacja między DT a sterowaniami

$$DTK9(.) = f(QP5(.), QP7(.), t_1, \Delta) \quad (10)$$

jest obliczana za pomocą omówionych w rozdziale 2 modeli transportu i degradacji zanieczyszczeń w oparciu o znane: objętości  $VP5$  i  $VP7$  wody, która musi być spuszczone w ciągu doby, stężenia BZT i TR w tych strumieniach, objętość VSS ścieków, które dopłynęły do oczyszczalni w dniu poprzednim, stężenia BZT i TR w ściekach oczyszczonych; prognozowane: wielkości dopływów bocznych  $QD5$  i  $QD8$  oraz stężenia ich zanieczyszczeń, wielkości poboru  $QU8$ , wielkości przepływu oraz stężeń BZT i TR w boczniku oczyszczalni. Rozważane modele są dyskretne, i jest oczywiste, że nie wszystkie możliwe kombinacje  $t_1$  oraz  $\Delta$  warto jest rozpatrywać. Szczegółowa analiza. [2], pokazała że wystarczy porównywać tylko 31 kombinacji. W konsekwencji algorytm działania USJC polega na kolejnej minimalizacji  $LDTK9(QP5(.), QP7(.), t_1, \Delta)$  przy stosownych ograniczeniach na  $QP5$  i  $QP7$ , gdzie dla każdej z 31 minimalizacji  $t_1$  są dane. Zauważmy tu, że proponowany sposób wyznaczenia zależności (10) jest dość skomplikowany, dlatego należy dążyć do znalezienia uproszczonego modelu tej zależności.

### 7. Proponowana struktura systemu sterowania

Jak wiadomo w każdym systemie wodno-gospodarczym można wyróżnić dwie zasadniczo odmienne sytuacje - stan normalny i stan nadzwyczajny (powódź lub długotrwała susza). Sytuacje nadzwyczajne wymagają określenia specjalnych sposobów podejmowania decyzji. i w naszych rozważaniach nie



Rys.5. Struktura systemu sterowania



były uwzględniane, co oznacza że proponowany system sterowania może pracować tylko w warunkach stanu normalnego.

Ogólny schemat struktury systemu sterowania przedstawiamy na rys.5. Zgodnie z przeprowadzonymi rozważaniami jest to system hierarchiczny, przy czym podział zadań dokonany został w oparciu o różnice funkcji wypełnianych przez poszczególne układy i częstotliwości działania (skalę czasu). Na najniższym poziomie znajdują się układy sterujące siecią dystrybucji - USDAB i USDC, układy sterujące pracą oczyszczalni - USJA i USJC, układy sterujące pracą zbiorników retencyjnych: zbiornika b-c (USZ1) i zespołu zbiorników d-e oraz f-g (USZ2). Wszystkie te układy podejmują decyzje raz na dobę. Decyzje USD i USJ są przedziałami stałymi funkcjami czasu, decyzje USZ to reguły decyzyjne. Jak wyjaśniono to w rozdziale 4 praca USZ jest koordynowana przez specjalny układ - zarząd zbiorników (USR) podejmujący decyzje raz na dekadę i rozwiązujący ZPD i ZPS. Na najwyższym poziomie znajduje się układ nadrzędny (UN) odpowiedzialny za gospodarkę wodną w całym regionie.

Jak wiemy cechą charakterystyczną systemów wodno-gospodarczych jest duża niepewność. Aby zmniejszyć jej wpływ na jakość działania całego systemu przyjęliśmy, że USD i USZ działają w sposób repetycyjny.

## 8. Wnioski

Przedstawiliśmy powyżej koncepcję zarządzania i sterowania w pilotowym systemie wodno-gospodarczym. Proponowany system sterowania składa się z trzech podsystemów: sterowania retencją, dystrybucją i jakością wody. Jak dotąd nie przeprowadziliśmy pełnej symulacji działania całego systemu, chociaż działanie każdego podsystemu było symulowane dla przykładowych scenariuszy realizacji niepewności. W tej sytuacji oczywistą kontynuacją analizy jest ukończenie badań symulacyjnych. Z drugiej strony lepsze zrozumienie "zachowania się" systemu oraz poprawa jakości sterowania mogą być osiągnięte tylko wtedy, gdy będziemy dysponowali brakującymi dotychczas modelami. Np. model samoczyszczenia w zbiorniku może być użyty do poprawy polityki retencji w celu uzyskania poprawy efektywności sterowania jakością wody. Ponadto, jak podkreślano to wielokrotnie, decyzję ostateczną w naszym systemie podejmuje człowiek. Głębsze uwzględnienie tego faktu może doprowadzić do bardziej wyrafinowanego dialogu pomiędzy decydentami a wspomagającymi ich komputerami.

## 9. Podziękowanie

Badania przedstawiane w tym artykule były prowadzone w ramach Programu Rządowego PR 7.01.05.01.

## 10. Literatura

- [1] Raport z zadania badawczego: "Opracowanie pilotowego modelu systemu wodno-gospodarczego do celu wyboru decyzji przy sterowaniu dyspozytorskim" opracowanego w ramach tematu O.1.09.01 programu PR-7, Instytut Automatyki PW, Warszawa 1981.

- [2] Raport z zadania badawczego: "Koncepcja sterowania dyspozytorskiego w pilotowym systemie wodno-gospodarczym wraz ze wstępnymi wynikami ilościowymi" opracowanego w ramach tematu 01.05.01 programu PR-7, Instytut Automatyki PW, Warszawa 1982.
- [3] S.Rinaldi, R.Soncini - Sessa, H.Stehfest, H.Tamura: Modelling and Control of River Quality, Mc Graw-Hill, New York 1979.
- [4] J.Dolecka, J.Dolecki, B.Klepacka, A.Usakiewicz: Rozkład godzinowego zapotrzebowania wody w większych miastach, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 5/80.
- [5] W.Findeisen, F.N.Bailey, M.Brduś, K.Malinowski, P.Tatjewski, A.Woźniak: Control and Coordination in Hierarchical Systems, J.Wiley, London 1980.
- [6] Raport z zadania badawczego: "Charakterystyka metod i struktur sterowania dyspozytorskiego" opracowanego w ramach tematu 01.08.01 programu PR-7, Instytut Automatyki PW, Warszawa 1980.
- [7] P.E.O. O'Connell: Stochastic Modelling of Long-terms Persistence in Stream Flows Sequences, Ph.D.Diss., Imperial College, University of London 1974.
- [8] G.Weiss: Shot noise models for generation of synthetic streamflow data, Water Resour.Res., vol. 13, no.1, 1977.
- [9] D.Beckard, I.Corbu, R.Gagnon, G.A.Nix, L.E.Parker, K.Stewart, H.Trinh: The Ottawa river regulation modelling system (ORRMS), in: Proc. of International Symposium on Real-Time Operation of Hydrosystem, Waterloo, Ontario, June, 24-26, 1981.
- [10] L.Becker, W.W.-G.Yeh, D.Fults, D.Sparks: Operation models for Central Valley project, J. of the Water Resources Planning and Management Div., vol.102, no.WR1, April 1976.
- [11] F.Fallside, P.F.Perry: A generalized mathematical model for water supply networks. Techn.Rep. no. 24, Dept. of Engineering, University of Cambridge, 1974.
- [12] G. Joalland, G.Cohen: Optimal control of a water distribution network by various multilevel methods, Proc.of the 7-th IFAC Congress, Helsinki 1978.

STRUCTURE DESIGN FOR DECISION MAKING AND CONTROL IN PILOT  
WATER MANAGEMENT SYSTEM

Control and management in a water resource system is discussed. A model of the system is presented. The control problem is stated so as to accomplish prescribed goals assuming desired performance of the system. The resulting control system is split into three interdependent subsystems: water retention, water distribution and water quality control units. Detailed formulation of problems solved by each unit is presented. The final decision making and control structure is found to be multiobjective and hierarchical.



## КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОПЫТНОЙ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ

### / Резюме /

Работа посвящается концепции управления в избранной водохозяйственной системе. Представлена математическая модель этой системы. Далее определяются задачи управления, обеспечивающие соответственное поведение системы. Предложена и обстоятельно описана иерархическая система управления, реализующая поставленные задачи.