

Krzysztof Malinowski

Andrzej Karbowski

Instytut Automatyki  
Politechniki Warszawskiej

Ewa Niewiadomska

Instytut Geofizyki PAN

KOMPUTEROWO GENEROWANE WIELOWARIANTOWE PROPOZYCJE  
DLA OPERATORSKIEGO STEROWANIA ZBIORNIKIEM RETENCYJNYM  
PODCZAS POWODZI

Streszczenie. Referat przedstawia koncepcję fragmentu systemu wspomagania decyzji operatora zbiornika retencyjnego podczas powodzi. Operator ten podejmuje decyzję dotyczącą aktualnego zrzutu ze zbiornika wybierając między kilkoma propozycjami wypracowanymi przez system wspomagający. Odpowiadają one różnym instrukcjom sterowania zastosowanym do bieżących prognoz dopływów do zbiorników. Operator ma również możliwość modyfikacji instrukcji stosownie do własnej oceny rozwoju sytuacji powodziowej.

#### 1. Wstęp

Pojawienie się małych i tanich komputerów o dość dużych możliwościach obliczeniowych wywołało zasadniczą zmianę w poglądach na temat komputerowych systemów sterowania obiektami wodnymi. Nastąpiło zdecydowane odejście od lansowanych wcześniej modeli w pełni zautomatyzowanych (które na dobrą sprawę i tak ze względu na brak zaufania ze strony operatorów - często uzasadniny - prawie nigdzie nie zostały w pełni wdrożone) w kierunku komputerowych systemów interakcyjnych [Loucks i in., 1985].

Poprzednio, w epoce dużych, drogich i trudno dostępnych komputerów, operator bądź uzyskiwał przed rozpoczęciem sterowania wyznaczoną przez komputer w trybie off-line regułę sterowania, bądź otrzymywał - wykorzystując komputer w trybie on-line od razu sterowanie, które powinien był zrealizować. Obecnie, mając do dyspozycji komputer

osobisty, z którym może komunikować się w bardzo łatwy i wygodny sposób tak ze względu na jakościowe nowe możliwości hardware'u (grafika wielokolorowa, mysz, pióro świetlne, etc.), jak i nowoczesnego software'u (menu, okienka, helpery - samouczki), operator ma dużo większe możliwości. Sformułowana została koncepcja, a obecnie szybko się rozwija metodologia tzw. systemów wspomaganie decyzji (ang. *Decision Support Systems - DSS*) [Ariav i Ginsberg, 1985]. Umożliwiają one łączne wykorzystanie kwalifikacji i doświadczenia operatora systemu sterowania oraz informacji *a priori* o procesie zapisanej w bazie danych i bazie modeli. Dzięki zastosowanym w DSS modelom symulacyjnym operator może zbadać jakie skutki przyniesie konkretna decyzja, jakie czynniki mają dominujący wpływ na przebieg procesu, na ile niebezpieczna jest wybrana polityka rzutów, etc.. Tak zwane systemy ekspertowe podpowiadają mu jak by się w jego sytuacji zachował wytrawny ekspert (odtworząc i - jeśli sobie tego zażyczy - uzasadniając jego rozumowanie) [Ambroziak, 1986]. Dawne modele optymalizacyjne zostały odsunięte na dalszy plan. Dużo większą uwagę zwraca się na zapewnienie wygodnej komunikacji człowieka z komputerem (wymaga się by była ona "user friendly" [Fedra, 1986]). Wydaje się jednakowoż, że zbytne poleganie na doświadczeniu operatora jest pewną przesadą, tak jak przesadne było wcześniejsze ślepe zaufanie do komputerowych algorytmów optymalizacyjnych. Właściwe podejście polegać powinno na dostarczeniu operatorowi nie tylko narzędzi służących do analizy rozmaitych wariantów decyzji ale również modeli wypracowujących te decyzje. W sposób dość naturalny można to uzyskać stosując rozmaite modele optymalizacyjne, w których na przykład operator mógłby zmieniać parametry.

Przedstawiana w niniejszej pracy koncepcja sterowania zbiornikiem w oparciu o generowane komputerowo wielowariantowe propozycje - koncepcja dotycząca fragmentu systemu wspomaganie decyzji operatora zbiornika - wynika z takiego właśnie podejścia.

## 2. Sformułowanie zadania sterowania zbiornikiem retencyjnym podczas powodzi. Instrukcja podstawowa

Do dzisiejszego dnia do sterowania operacyjnego zbiorników retencyjnych podczas powodzi wykorzystywane są tzw. sztywne lub półsztywne instrukcje powodziowe. Instrukcje tego typu są określone poprzez tabele, wykresy, nomogramy, zalecenia itp., i wyrażają wielkość rzutu w funkcji aktualnego napełnienia zbiornika, napełnienia nominalnego, dopływu bieżącego, rzadziej prognozowanej kubatury dopływów w ciągu najbliższej doby itp.. Oczywiście krzywa rzutów wynikająca z tradycyjnej metody sterowania (nazwijmy ją IO) powinna być jedną z propozycji przedstawianych przez DSS operatorowi. Inne propozycje będą

wpracowane przez komputer przy wykorzystaniu pewnej metodologii optymalizacyjnej. Spróbujmy zatem sformułować nasz problem w kategoriach zadania sterowania optymalnego.

Podstawowym celem sterowania zbiornikiem podczas powodzi jest ochrona zbiornika oraz redukcja szkód wywołanych przez wysoki poziom wód poniżej tego zbiornika. W sytuacji gdy najbardziej zagrożony obszar jest położony w pobliżu zbiornika oraz gdy między zbiornikiem a "centrum szkód" nie ma żadnego dopływu bocznego, zadanie minimalizacji szkód jest równoważne minimalizacji kulminacji zrzutu ze zbiornika.

Oznaczmy chwilę bieżącą poprzez  $\tau$ . Zakładamy że DSS pracuje w trybie on-line w sposób repetycyjny wykorzystując uaktualniany co  $T_L$  godzin pomiar napełnienia zbiornika oraz nową prognozę dopływu.

Optymalny zrzut ze zbiornika  $\hat{u}_{[\tau, t_f]}$  od danej chwili  $\tau$  do chwili końcowej  $t_f$  jest określony, zgodnie z wcześniejszą uwagą jako rozwiązanie następującego problemu:

$$\min_u \max_{t \in [\tau, t_f]} u(t) \quad (1)$$

przy ograniczeniach :

$$\dot{w} = \bar{d}_1^T - u(t) \quad (2)$$

$$w(\tau) = w^T(\tau) \quad (3)$$

$$w(t_f) = w_{\max} \quad (4)$$

$$w_{\min} \leq w(t) \leq w_{\max} \quad (5)$$

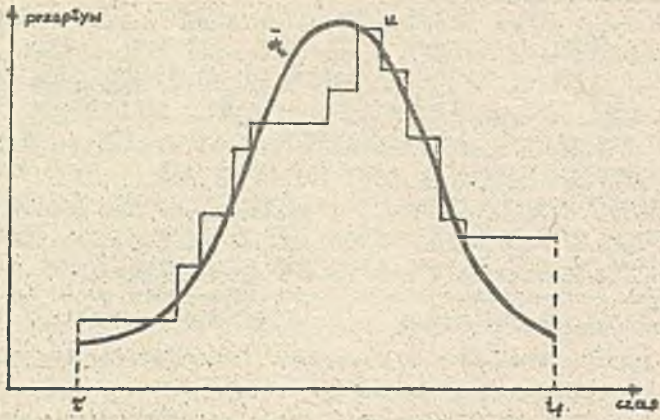
$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}(w(t)) \quad t \in [\tau, t_f] \quad (6)$$

gdzie

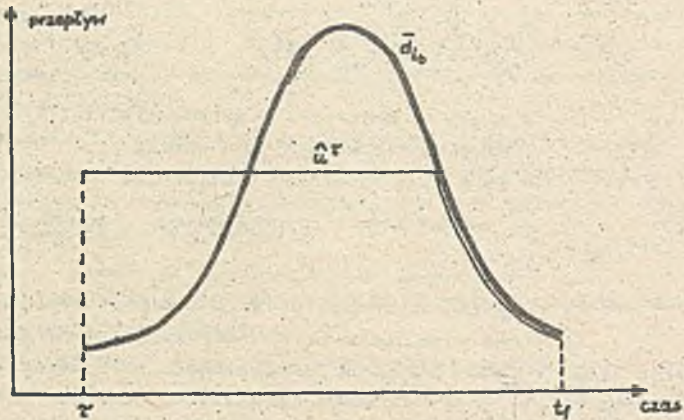
- $u$  - zrzut ze zbiornika w przedziale  $[\tau, t_f]$ ,
- $w(t)$  - napełnienie zbiornika w chwili  $t$ ,
- $w^T(\tau)$  - zmierzone napełnienie zbiornika w chwili  $\tau$ ,
- $\bar{d}_1^T$  - najbardziej prawdopodobny scenariusz powodzi

(prognoza długoterminowa otrzymana według modelu przedstawionego w [Malinowski i Karbowski, 1985]) na przedziale  $[\tau, t_f]$ , określony w chwili  $\tau$ .

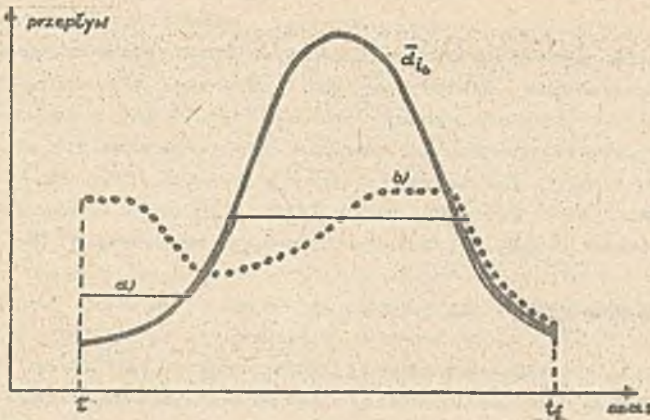
Ograniczenia (5) i (6) wyrażają konieczność utrzymywania poziomu piętrzenia zbiornika oraz wartości zrzutów w pewnych dozwolonych przedziałach i wynikają z charakterystyki zbiornika oraz możliwości jego urządzeń upustowych. Kompletna analiza problemu (1)-(6) została przedstawiona w [Karbowski, 1986]. Typowe rozwiązania tego zadania obrazują rysunki 1-3.



Rys. 1. Zrzut wynikający z instrukcji tradycyjnej IO



Rys. 2. Zrzut wynikający z instrukcji podstawowej II, gdy nieaktywne są ograniczenia na trajektorie zrzutu i napełnienia



Rys.3. Zrzuty odpowiadające instrukcji podstawowej I1, gdy aktywne są ograniczenia:

- a) dolne na retencję
- b) górne na zrzut

W skróconej formie możemy napisać, że optymalny zrzut ze zbiornika  $\hat{u}^T$ , gdzie  $\tau$  oznacza chwilę jego wyznaczenia, wynika z pewnej reguły sterowania  $\mathcal{R}$ :

$$\hat{u}^T = \mathcal{R}(w^T(\tau), d_1^T, b[\tau, t_1]) \quad (7)$$

Reguła ta wiąże wartość zrzutu z wartością napełnienia aktualnego i prognozy dopływu do zbiornika. Zalecenie realizacji polityki zrzutów zgodnej z regułą  $\mathcal{R}$  będziemy dalej nazywać instrukcją podstawową (I1). Operator traktuje  $\hat{u}^T$  (tak jak i zrzut wynikający z gospodarki tradycyjnej) jako jedną z alternatywnych polityk zrzutów branych pod uwagę w chwili  $\tau$ .

Badania symulacyjne [Raporty IAPW, 1981-1985] wykazały, że instrukcję podstawową należy stosować z pewnym umiarem. Jest ona użyteczna przede wszystkim wtedy, gdy dysponujemy w miarę dobrymi prognozami dopływu (np. w okolicy kulminacji). Wynika to stąd, iż kształt trajektorii zrzutu wyznaczonego w oparciu o tę instrukcję zależy bardzo silnie od prognozy długoterminowej dopływu. Powoduje to w przypadku repetycji pojawienie się znacznych skoków zrzutu wtedy, gdy kolejne prognozy bardzo się różnią, np. na początku horyzontu sterowania (dysponujemy wówczas najmniejszym zasobem informacji o procesie dopływu wobec czego prognozy stawiane są z dużym błędem). Gwałtowne zmiany zrzutu są zjawiskiem negatywnym. Wpływają ujemnie na użytkowników

systemu, utrudniają pracę operatora wzbudzając jednocześnie jego nieufność do wykorzystywanej metody wyznaczania optymalnego sterowania. Ponadto sterowania wyznaczone na podstawie błędnych prognoz mogą prowadzić do podjęcia niekorzystnych decyzji. W tej sytuacji zdecydowano się zaproponować operatorowi jeszcze dwie inne instrukcje uzyskane na drodze modyfikacji podstawowej reguły sterowania (7). Są to: instrukcja z uśrednianiem rzutów ze zbiornika (I2) oraz instrukcja z przewidywaniem jednej przyszłej interwencji operatora (I3).

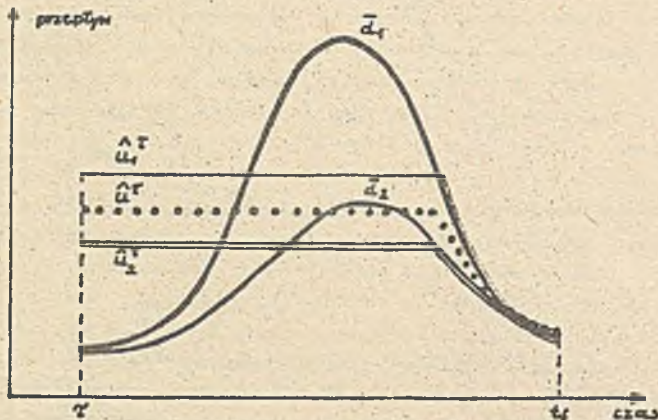
### 3. Modyfikacje instrukcji podstawowej

#### 3.1 Instrukcja z uśrednianiem rzutów ze zbiornika (I2)

Pierwszym krokiem modyfikacji reguły podstawowej było zwiększenie informacji o procesie dopływu do zbiornika. Instrukcja z uśrednianiem przewiduje wykorzystanie zestawu kilku prognoz długoterminowych dopływu (a nie jednej "najlepszej" jak reguła podstawowa). W chwili aktualnej  $\tau$  operator dysponuje pękiem  $N$  prognoz dopływu  $\bar{d}_i$ ,  $i=1, \dots, N$ . Przypisuje im pewne wartości wagowe  $v_i^T$ . Dla każdego scenariusza wyznacza rzut optymalny ze zbiornika korzystając z reguły podstawowej  $I_1$  (7). Obliczone w ten sposób rzuty zostają następnie uśrednione. Uzyskane prawo sterowania możemy wyrazić w następujący sposób:

$$\hat{u}^T = \sum_{i=1}^N v_i^T \cdot \mathcal{R}(w^T(\tau), \bar{d}_i^T[\tau, t_f]); \quad \sum_{i=1}^N v_i^T = 1 \quad (8)$$

Zasada działania instrukcji przedstawiona jest na rysunku 4, zaś na rysunku 6 pokazano trajektorię realizowanego rzutu będącą wynikiem symulacji repetycyjnego sterowania zbiornikiem wyłącznie według reguły (I2).



Rys. 4. Zrzut wynikający z instrukcji z uśrednianiem I2

### 3.2 Instrukcja z przewidywaniem jednej przyszłej interwencji operatora zbiornika (I3).

Przedstawione powyżej instrukcje sterowania nie biorą pod uwagę przyszłych interwencji operatora. W rzeczywistości zrzut ze

zbiornika wyznaczany jest repetycyjnie dla uaktualnianych prognoz dopływów, przyjmując za stan początkowy zbiornika stan ostatnio zmierzony. Instrukcja z przewidywaniem jednej przyszłej interwencji wzbogaca model optymalizacyjny o informację dotyczącą przyszłego postępowania operatora. W momencie podejmowania decyzji  $\tau$  operator zakłada, że do godziny  $t_1 = \tau + \Delta t$  będzie realizował stały zrzut  $\bar{u}_0 = \text{const}$ . Po okresie czasu  $\Delta t$  (tzn. w chwili  $t_1$ ) wyznaczy dla aktualnych danych nowe sterowanie. Będzie ono obowiązywać do końca horyzontu sterowania powodzią  $C$  a więc zakłada iż począwszy od chwili  $t_1$  interweniować nie będzie. Optymalny zrzut obowiązujący od godziny  $t_1$  wyznacza korzystając z instrukcji podstawowej (7):

$$\bar{u}_1(t) = \mathcal{R}(w_{11}(\bar{u}_0), \bar{d}_1^T) \quad t_1 < t \leq t_f \quad (9)$$

gdzie

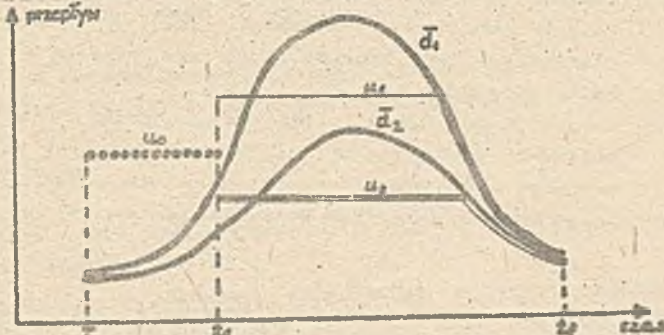
$$w_{11}(\bar{u}_0) = w^f(\tau) + \int_{\tau}^{t_1} [d_1^T(t) - \bar{u}_0] dt \quad (10)$$

jest przewidywanym napełnieniem zbiornika w chwili  $t_1$  będącym wynikiem realizowania zrzutu  $\bar{u}_0 = \text{const}$ . na przedziale  $[\tau, t_1]$ .

Po wyznaczeniu sterowania  $\bar{u}(t)$ ,  $i=1 \dots N$  dla każdego scenariusza (przypomnijmy, iż operator dysponuje pękiem  $N$  prognoz dopływu) operator uzyska optymalną wartość zrzutu realizowanego na horyzoncie  $[\tau, t_1]$  rozwiązując zadanie:

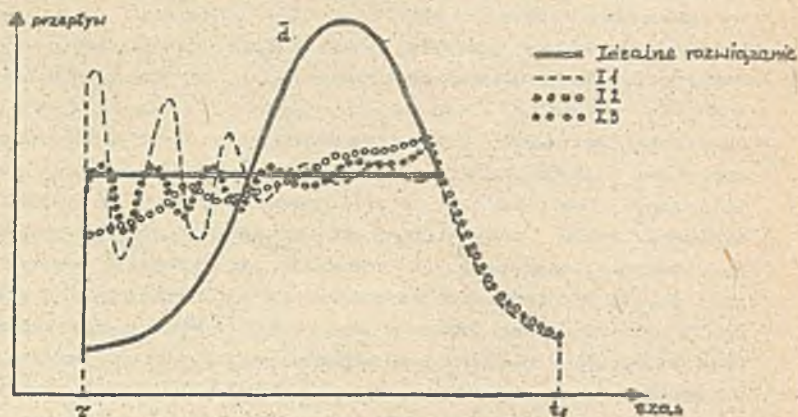
$$\min_{\bar{u}_0} \max_{\bar{u}_0} \{u_0, \sum_{i=1}^N v_i^T \max_{t \in [t_1, t_f]} \bar{u}_i(t)\} \quad (11)$$

Zasada działania instrukcji jest przedstawiona na rysunku 8.



Rys. 8. Zrzut wynikający z instrukcji z przewidywaniem jednej przyszłej interwencji operatora I3

Na rysunku 6 pokazano trajektorie wyznaczonego zrzutu będącą wynikiem symulacji repetycyjnego sterowania zbiornikiem według reguły (I3).



Rys. 6. Realizacje uzyskane podczas symulacji różnych reguł sterowania w porównaniu z rozwiązaniem idealnym

#### 4. Wykorzystanie proponowanych instrukcji w DSS

Nie chcąc wchodzić zbyt głęboko w sprawy "technologii programowania" DSS [Fedra, 1986] odnotować należy wymagania jakie musi on spełniać.

- (i) powinien prezentować graficznie zarówno dotychczasowy dopływ do zbiornika, jego prognozę jak i wszystkie 4 propozycje sterowań,
- (ii) określanie sposobu pracy systemu jak i zmiany parametrów powinny odbywać się w maksymalnie naturalny i wygodny sposób np. za pomocą menu (ang. menu-driven),
- (iii) operator powinien mieć możliwość obserwacji na bieżąco efektów zmiany parametrów instrukcji, np. za pomocą "dynamicznej grafiki" - tzn. zmieniających się stosownie do aktualnych rezultatów obrazów,
- (iv) odczytywanie danych bieżących pochodzących z pomiarów lub obliczeń "zewnętrznych" takich jak aktualny stan zbiornika, prognozy dopływów, powinno być ukryte przed użytkownikiem i zorganizowane za pomocą stale aktualizowanej bazy danych.

#### 5. Wnioski

Analizując przedstawioną powyżej koncepcję systemu wspomaganie decyzji można sformułować następujące wnioski:

- (i) operator może wpływać na wysokość realizowanego zrzutu



bezpośrednio - wybierając jedną z czterech propozycji wynikających z czterech reguł wyznaczania optymalnego sterowania, lub pośrednio - zmieniając parametry występujące w instrukcjach (np. wartości wagowe  $v_1^T$  przyporządkowane każdej prognozie dopływu).

(ii) Instrukcje I2, I3 pozwalają na korzystanie z większego zasobu informacji dotyczących procesu dopływu oraz przyszłego postępowania operatora. Instrukcja I1 jest najlepsza dla dobrych prognoz, instrukcja I0 jest instrukcją konserwatywną. Analiza kształtu trajektorii rzutu wyznaczonej według reguły podstawowej I1 (rysunek 6) potwierdza fakt występowania bardzo silnych "szarpań" w pierwszych godzinach sterowania. Wykorzystanie wówczas instrukcji z uśrednianiem I2 pozwoliłoby na uspokojenie zrzutów. Jeszcze lepsze efekty uzyskalibyśmy stosując instrukcję z przewidywaniem interwencji. Z kolei, w okresie dobrych prognoz instrukcja podstawowa jest bezkonkurencyjna ponieważ gwarantuje ona najbardziej stabilną politykę zrzutów. Instrukcje zmodyfikowane w tym okresie dają bardziej zmienną trajektorię zrzutów, gdyż korzystają z wielu prognoz, które się między sobą różnią. Na przykład gdy mamy dwie prognozy: synoptyczną i bezopadową końcowy odcinek rzutu napełniającego zbiornik będzie krzywą rosnącą ze względu na niedopełnienie zbiornika w okresie wcześniejszym spowodowane uwzględnieniem prognozy bezopadowej. Oznacza to, iż operator powinien prowadzić aktywną politykę zrzutów zmieniając (stosownie do własnej oceny sytuacji powodziowej) instrukcję, z której korzysta. Instrukcja tradycyjna I0 ma mu dać ocenę w jakim stopniu jego zachowanie jest niekonwencjonalne.

(iii) System może być rozbudowany o moduł "ekspertowy", w którym byłaby napisana reguła empiryczna wynikająca z doświadczeń poprzedniego operatora zbiornika, który potrafił dobrze sterować zbiornikiem w przeszłości. Może to być o tyle kłopotliwe, że do tej pory na ogół podczas sterowania trzymano się instrukcji, a gdy od nich odchodzono dawało to złe rezultaty.

Praca została wykonana w ramach CPBP Nr 03.09  
"METODY ANALIZY I UŻYTKOWANIA ZASOBÓW WODNYCH"

## 6. Literatura

- Ambroziak, J. Systemy ekspertowe. *Informatyka*, No. 11-12/1986 i 1/1987, str. 19-21, 1986-1987.
- Ariav, G. i J. M. Ginzberg, DSS Design: A Systematic View of Decision Support. *Communications of the ACM*, vol. 28, No. 10, str. 1045-1052, 1985.

- Fedra, K., Decision Making in Water Resources Planning: Models & Computer Graphics, *International UNESCO Symposium on Decision Making in Water Resources Planning* (Oslo, 5-7 maja 1986), 1986.
- Karbowski, A., Optymalne sterowanie zbiornikiem retencyjnym podczas powodzi w warunkach deterministycznych, *maszynopis*, 1985.
- Loucks, D. P., J. Kindler i K. Fedra, Interactive Water Resources Modeling and Model Use: An Overview, *Water Resources Research*, vol. 21, No. 2, str. 95-102, 1985.
- Malinowski, K. i A. Karbowski, Hierarchiczna Struktura Sterowania Falą Powodziową w Dorzeczu Górnej Wisły, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Automatyka*, z. 78, Nr kol. 847, 1985.
- Niewiadomska, E., Własności i zastosowanie zmodyfikowanej instrukcji lokalnych w strukturze sterowania falą powodziową, *Praca dyplomowa IA PW*, Warszawa 1986.
- Raporty IAPW, Raporty tematu PR-7.03.08.11 z lat 1981-1985, Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej.

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ МНОГОВАРИАНТНЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩЕМ ВО ВРЕМЯ НАВОДНЕНИЯ

### Резюме

В работе даётся идея части системы, поддерживающей диспетчера при принятии решения во время наводнения. Диспетчер выбирает одно из нескольких правил, которые можно изменять.

## COMPUTER-GENERATED MULTIVARIANT SUGGESTIONS FOR THE OPERATOR CONTROL OF THE RESERVOIR DURING THE FLOOD

### Summary

The paper presents a concept of the part of the decision support system for a reservoir operator during the flood. The operator makes the decision about the actual release choosing one of the several operating rules. He has the possibility of modifying these rules too.

Recenzent: Dr inż. Janusz FILIMOWSKI

Wpłynęło do Redakcji 17.06.1987 r.