

Roman GIERASIMIUK
Andrzej KARBOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI
Andrzej MARKOWSKI
Instytut Automatyki
Politechnika Warszawska

SYMULATOR ANALOGOWY TRANSFORMACJI FALI
POWODZIOWEJ W DORZECZU GÓRNEJ WISŁY

Streszczenie. Przedstawiono koncepcję, zasadę działania i strukturę symulatora transformacji fali powodziowej. Omówiono model matematyczny procesu spływu fali powodziowej przez fragment dorzecza. Model ten jest uproszczony przez przyjęcie reprezentacji o parametrach skupionych, ale jednocześnie jest na tyle rozbudowany, że pozwala uwzględnić zjawiska dopływu bocznego oraz oddziaływań zwrotnych (tzw. podpiętrzania). Celem takiego sformułowania modelu było dostosowanie do realizacji w technice analogowej, która znacznie ułatwia symulację zjawisk dynamicznych zachodzących podczas spływu fali, a jednocześnie pozwala na wydatne zmniejszenie czasu symulacji, co ma istotne znaczenie przy wykorzystaniu symulatora w centrum dyspozytorskim sterowania falą powodziową. Przedstawiono najważniejsze szczegóły konstrukcji właściwego symulatora (tj. modelu analogowego sieci zbiorników) oraz urządzeń sprzęgających z komputerem cyfrowym, tworzących łącznie specjalizowany hybrydowy (cyfrowo-analogowy) zestaw obliczeniowy przeznaczony do symulacji spływu fali powodziowej. Przytoczono wyniki przeprowadzonych prób, które wskazują na możliwość osiągnięcia znacznych korzyści natury czasowej i technicznej przy wykorzystaniu symulacji analogowej do rozwiązywania zadań tego typu.

1. Wprowadzenie

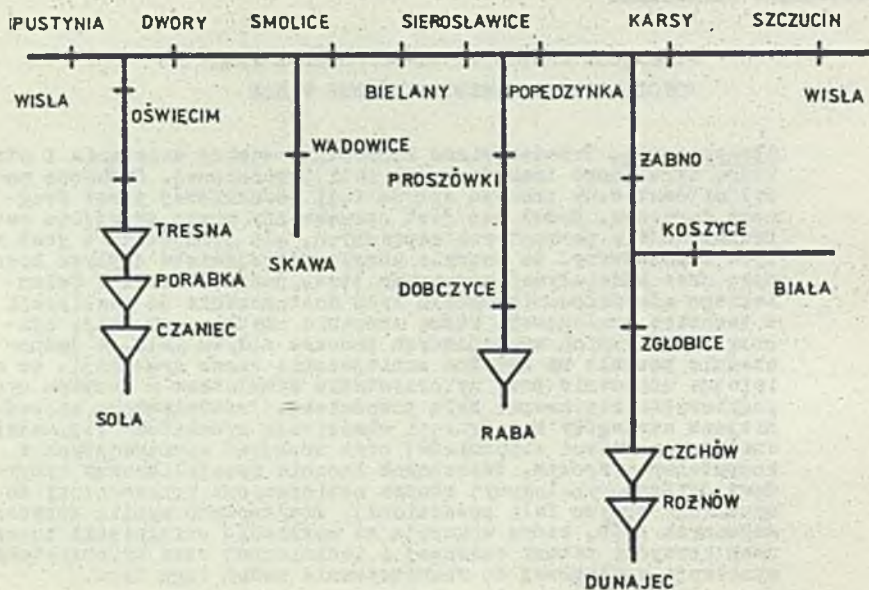
W związku z pracami prowadzonymi w Instytucie Automatyki Politechniki Warszawskiej w ramach Programu Rządowego IR-7, kierunek O5 opracowano koncepcję hierarchicznej struktury sterowania falą powodziową. Jednym z podstawowych elementów tej struktury jest symulator spływu fali powodziowej. Może on być wykorzystywany w centrum dyspozytorskim do estymacji możliwych (odpowiadających różnym scenariuszom powodzi) kulminacji przepływów i strat powodziowych w systemie rzeczonym. Dzięki temu dyspozytor może, na przykład, modyfikować wartości parametrów lokalnych reguł decyzyjnych, stosowanych przez operatorów zbiorników retencyjnych. Żeby wyznaczyć optymalne wartości tych parametrów, musi on jednak wielokrotnie wykorzystywać symulator podczas każdej swojej interwencji.

Rozwiązanie numeryczne układu równań różniczkowych opisujących transformację fali powodziowej w dorzeczu zajmuje bardzo dużo czasu. Na przykład, na MERZE-400 symulacja 300-godzinnej powodzi w dorzeczu Górnej Wisły trwa od 90 do 120 sekund.

W tej sytuacji bardzo potrzebne okazało się zastosowanie symulatora analogowego, który w połączeniu z komputerem cyfrowym może szybko i dokładnie symulować transformację fali powodziowej. W szczególności może on uwzględniać tak ważne zjawiska hydrologiczne, jak podpiętrzanie i dopływy boczne rozłożone.

2. Model matematyczny transformacji fali powodziowej w korytach rzek

Modelowaną część dorzecza podzielono na odcinki i węzły odpowiadające częściom koryt pomiędzy przekrojami wodowskazowymi (rys. 1).



Rys.1. Układ dorzecza Górnej Wisły

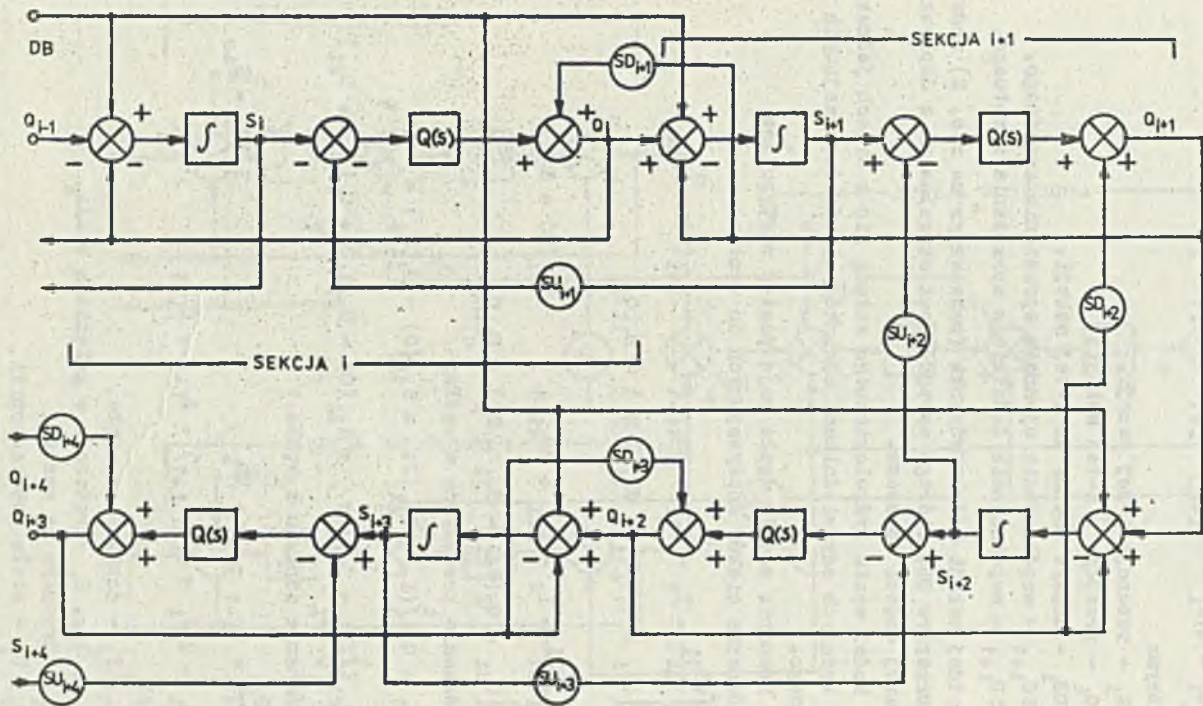
W układzie dorzecza (z uwagi na brak danych) pominięto mniejsze cieki; są one reprezentowane (wraz ze spływem powierzchniowym) w postaci dopływu bocznego rozłożonego DB, będącego sumą ważoną odpowiednich naturalnych dopływów skupionych DBS:

$$DB = \sum_{j=0}^N A_j DBS_j \quad (1)$$

gdzie: $A \in (0,1)$,

N - liczba branych pod uwagę dopływów.

Odcinek cieku, zależnie od długości odpowiadającej mu części koryta, jest modelowany przez kilka identycznych sekcji (rys. 2). Pojedyncza sekcja jest opisana równaniem:



rys. 2. Model odcinka ciekłu

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = Q_{1-1} - Q_1 + DB_1 & S_1(0) = S_{10} \\ Q_1 = Q(S_1 - SU_{1+1} \cdot S_{1+1}) + SD_{1+1} Q_{1+1} \end{cases} \quad (2)$$

w którym:

- S_1 - retencja i-tej sekcji,
- Q_1 - przepływ w i-tej sekcji,
- DB_1 - dopływ boczny do i-tej sekcji,
- SU_{1+1} - współczynnik ujemnego sprzężenia zwrotnego,
- SD_{1+1} - współczynnik dodatniego sprzężenia zwrotnego.

Do każdej sekcji modelu odcinka (pokazanego na rys. 2) dodaje się ten sam przepływ DB, którego wartość jest skorelowana z dopływami do rozpatrywanej części dorzecza.

Model węzła hydrologicznego składa się z trzech jednakowych segmentów, będących odpowiednikami odcinków cieków dopływających i ciekę odpływającego.

Równania modelu węzła mają postać następującą:

1. Równania cieków dopływających do węzła:

$$\begin{cases} \frac{dS_{11}}{dt} = I_1 - Q_{11} + DB_{11-1} & S_{11}(0) = S_{110} \\ Q_{11} = Q_1(S_{11} - U_{11} \cdot S_1) + D_{11}Q_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{dS_{21}}{dt} = I_2 - Q_{21} + DB_{21-1} & S_{21}(0) = S_{210} \\ Q_{21} = Q_2(S_{21} - U_{21} \cdot S_1) + D_{21}Q_1 \end{cases} \quad (4)$$

2. Równanie przepływów w węźle:

$$\begin{aligned} Q_{1-1} = & Q_1 \left(\int_0^t (I_1 - Q_{11}) d\tau + S_{11}(0) - U_{11}S_1 \right) + \\ & + Q_{21} \left(\int_0^t (I_2 - Q_{21}) d\tau + S_{21}(0) - U_{21}S_1 \right) + Q_1 (D_{11} + D_{21}) \end{aligned} \quad (5)$$

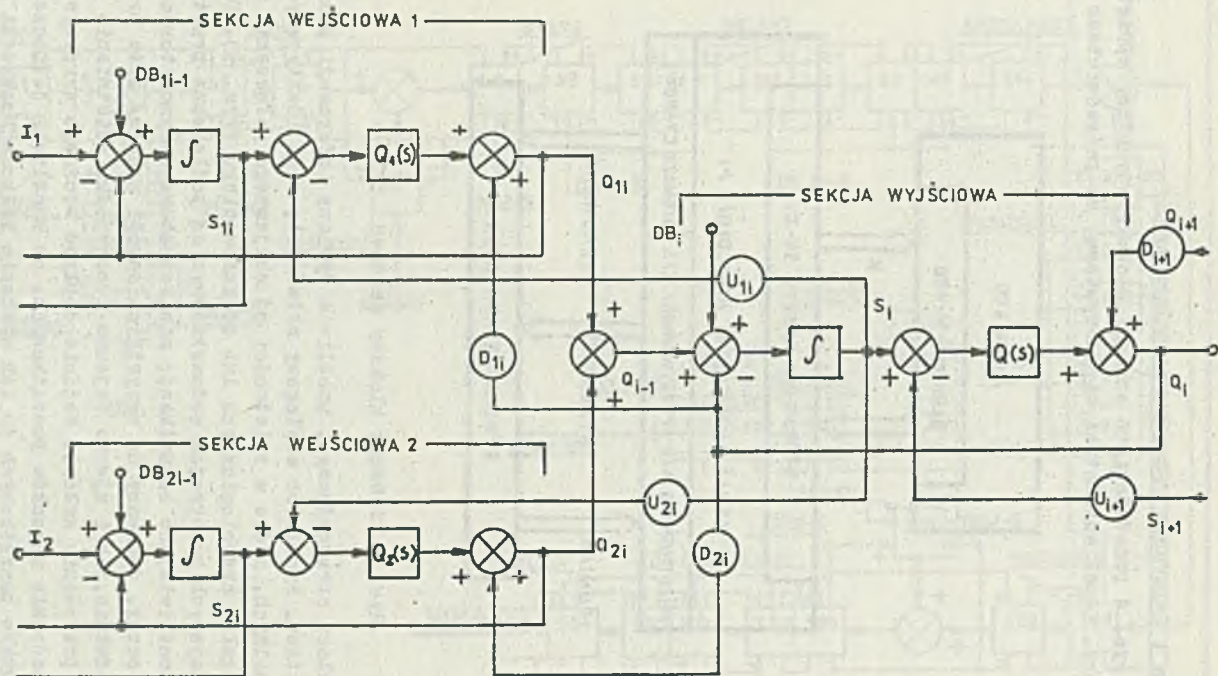
3. Równania odpływu z węzła:

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = Q_{1-1} - Q_1 + DB_1 & S_1(0) = S_{10} \\ Q_1 = Q(S_1 - U_{1+1}S_{1+1}) + D_{1+1} \cdot Q_{1+1} \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

- I_1, I_2 - dopływy do węzła,
- S_{11}, S_{21}, S_1 - retencje w gałęziach węzła,
- Q_1 - przepływ za węzłem,
- D_1, U_1 - stałe współczynniki,

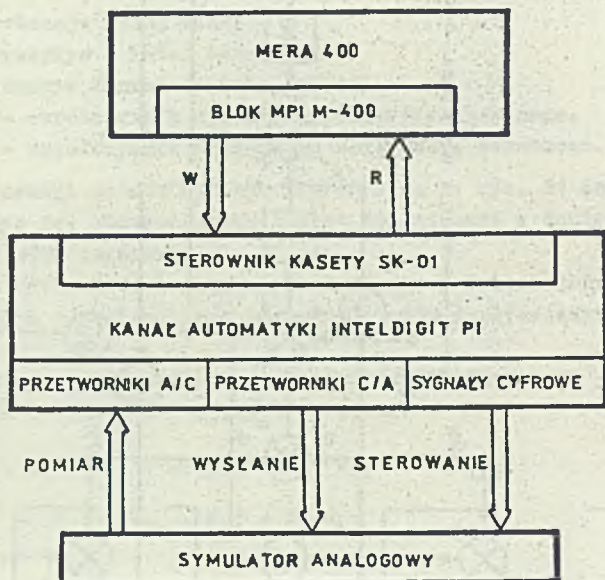
Powyższy model węzła hydrologicznego, pomimo swej prostoty, pozwala uwzględnić pewne zjawiska związane z oddziaływaniem mas wody występujących w sąsiednich korytach. Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy modelu węzła. Jego struktura jest podobna do struktury modelu odcinka cieków, w wyniku czego w realizacji technicznej symulatora analogowego zastosowano identyczne bloki funkcjonalne odpowiednio ze sobą połączone.



Rys. 3. Model węzła hydrologicznego

3. Budowa i działanie symulatora analogowego

Na rys. 4 przedstawiono schemat blokowy struktury sprzętu zestawu symulatora. Kanał automatyki minikomputera, za pośrednictwem specjalizo-



Rys. 4. Schemat blokowy zestawu

wanego bloku sprzęgającego, umożliwia wymianę informacji pomiędzy elementami zestawu. Symulator analogowy składa się z 34 identycznych bloków funkcjonalnych, które w zależności od wzajemnego połączenia mogą tworzyć modele węzłów hydrologicznych lub odcinków cieku (rys. 5). Do punktów odpowiadających przekrojom wodowskazowym są podłączone przetworniki c-a i a-c, umożliwiające komunikację minikomputera z symulatorem analogowym. Dopływ boczny, dodawany do wszystkich sekcji modelu, może przyjmować wartości dodatnie, jak i ujemne (ujemne w przypadku zaistnienia potrzeby symulacji przerwania wałów). Wejścia dopływu bocznego wykorzystano również do wprowadzania warunków początkowych, co umożliwia jednoczesne ustalanie się warunków początkowych po ich wysłaniu kilkoma rozkazami minikomputera. W każdej chwili trwania symulacji urządzenie może zapamiętać na kilka minut aktualne wartości przepływów.

Każdy cykl pracy symulatora rozpoczyna się od wyzerowania wszystkich integratorów, następnie są wprowadzane warunki początkowe - pamiętane przez kilka cykli rozkazowych minikomputera do momentu rozpoczęcia symulacji. Wszystkie stany pracy symulatora analogowego w czasie prowadzenia

obliczeń są ustalane automatycznie, bez ingerencji użytkownika. Program obsługi symulatora dla zaoszczędzenia czasu wykonania został napisany w języku asemblera i wykonuje wszystkie operacje związane ze skalowaniem wielkości, sterowaniem pracą i wymianą informacji, jak również dokonuje obliczeń związanych z wysyłaniem warunków początkowych i dodawaniem dopływu bocznego.

Współpraca minikomputera z symulatorem analogowym została zorganizowana tak, aby kolejne wartości były przygotowywane z wyprzedzeniem w czasie oczekiwania na zakończenie poprzedniego cyklu komunikacji. Program symulacji analogowej wywołuje się w minikomputerze przez funkcję HSSFP z następującymi parametrami:

- ZZ - zrzuty ze zbiorników,
- DZ - dopływy do zbiorników,
- DES - dopływy boczne skupione,
- DDZ - dodatkowe dopływy zasilające,
- HZP - hydrogramy zmierzone w przekrojach,
- $\langle T\theta, TK \rangle$ - horyzont symulacji,
- KONF - numer konfiguracji,
- WP - warunki początkowe w przekrojach kontrolnych,
- BLEDY - kronika błędów.

4. Dobór parametrów i metody strojenia

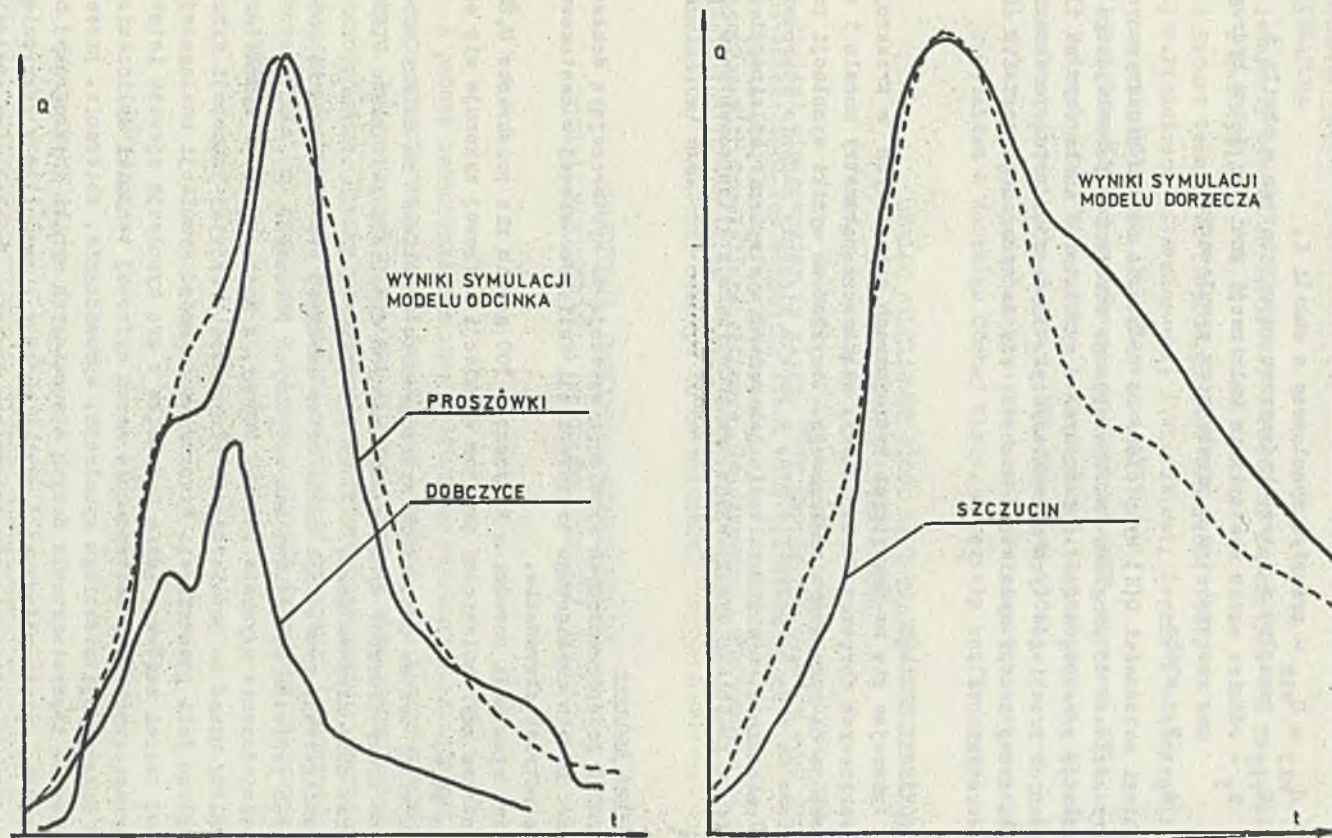
Programy służące do określania parametrów są oparte na cyfrowym programie symulacyjnym przedstawionego powyżej modelu transformacji fali podwodzowej. Z uwagi na dużą liczbę parametrów modelu do ich wyznaczenia zastosowano optymalizację etapową, wykorzystując metodę przesuwanej funkcji kary z algorytmem minimalizacji Neldera-Weada. Identyfikację parametrów modelu odcinka podzielono na dwa etapy: wyznaczanie przebiegu nieliniowej zależności $Q(S)$ (równanie 2) oraz dobranie współczynników A_j dopływu bocznego (wzór 1). Wyznaczanie parametrów modelu węzła odbywa się w czterech etapach; w pierwszej kolejności poszukuje się funkcji $Q(S)$, $Q_1(S)$, $Q_2(S)$, następnie są określane współczynniki D_1 , D_2 , U_1 , U_2 (równania 3, 4, 5, 6). Wszystkie etapy powtarza się wielokrotnie, wykorzystując różne punkty startowe wyznaczone metodami pomocniczymi. Przedstawiony sposób postępowania nie gwarantuje znalezienia minimum globalnego, ale w efekcie daje zadowalające wyniki.

Przy rozwiązywaniu powyższego zadania zastosowano wskaźnik jakości będący sumą ważoną wartości bezwzględnych odchyleń w kolejnych punktach dyskretnych pomiędzy hydrogramami rzeczywistymi a przebiegami symulowanymi:

$$W = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N A_{ij} \cdot |Q_{nij} - Q_{rij}| + B R_j \right) \quad (7)$$

gdzie:

- N - liczba punktów dyskretyzacji na osi czasu,
- M - liczba danych hydrogramów rzeczywistych,



Rys. 6. Przykładowe wyniki symulacji

- $Q_{s1j} = Q_{s1k}$ - przepływ symulowany w chwili 1,
 Q_{r1j} - przepływ z j-tego hydrogramu rzeczywistego w chwili 1,
 R_j - różnice czasu wystąpienia kulminacji pomiędzy j-tym hydrogramem rzeczywistym a przebiegiem symulowanym,
 A_{1j}, B - stałe.

Przebiegi zależności $Q(S)$ wyznaczone na podstawie danych historycznych są przekazywane do programu umożliwiającego strojenie, pozwalającego na obserwację przebiegów $Q(S)$ zmierzonych w symulatorze analogowym na tle pożądaných przebiegów tych charakterystyk. Pokręcając potencjometrami na panelu danej sekcji symulatora dochodzi się do wymaganego kształtu charakterystyki $Q(S)$.

5. Omówienie wyników

Opierając się na dostępnych hydrogramach zmierzonych w przekrojach wodowskazowych dorzecza Górnej Wisły, wyznaczono parametry modelu i wprowadzono je do symulatora analogowego. Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na rys. 6. Najważniejsze, z punktu widzenia zadania sterowania falą powodziową, wielkości, takie jak moment wystąpienia kulminacji i amplituda przebiegu symulowanego, są odtwarzane z kilkuprocentowym błędem.

6. Uwagi końcowe

1. Wyniki przeprowadzonych symulacji wskazują na wystarczającą dokładność modelu analogowego transformacji fali powodziowej w zastosowaniu do potrzeb sterowania.
2. Czas symulacji powodzi o horyzoncie 300 godzin nie przekracza 0,8 s, podczas gdy analogiczny program symulacji cyfrowej wykonuje się około 90 s.
3. Omówiony zestaw symulatora wykazuje małą wrażliwość na zmiany warunków pracy (rozrzut wyników powtarzanych symulacji jest rzędu 0,3%) oraz dużą niezawodność.
4. Konfigurację symulatora można łatwo zmieniać przez dołączenie dodatkowych pakietów lub zmianę ich wzajemnych połączeń.
5. Doświadczenie uzyskane podczas budowy, a następnie prób symulatora należy uznać za potwierdzenie słuszności przyjętej koncepcji symulacji spływu fali powodziowej. Wykorzystanie metod symulacji analogowej w tej części zestawu, gdzie wchodziła w grę symulacja zjawisk istotnie dynamicznych oraz zastosowanie metod cyfrowej techniki obliczeniowej do organizacji przebiegu symulacji, wprowadzania, zbierania, przechowywania i przetwarzania danych stanowiących wyniki (hydrogramy) historyczne, wyniki pośrednie i wyniki końcowe - pozwoliło z korzyścią wyzyskać uzupełniające się zalety obu technik. Powstał więc specjalizowany zestaw hybrydowy, w którym część analogową (właściwy symulator fali powodziowej) można uważać za realizację sprzętową podprogramu symulacji modelu transformacji fali powodziowej w komputerze cyfrowym.

LITERATURA

- [1] Raporty tematu RR-7.05.08.11. Instytut Automatyki Pw, Warszawa, z lat 1981-84.
- [2] Raport tematu RR-7.05.08.03 IMGW O/Kraków, 1981.
- [3] W.Findeisen, J.Szymanowski, A.Wierzbicki: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji, PWN, Warszawa 1977.
- [4] W.I.Zangwill: Programowanie nieliniowe, WNT, Warszawa 1974.
- [5] T.Kreglewski, T.Rogowski, A.Ruszczyński, J.Szymanowski: Metody optymalizacji w języku Fortran, PWN, Warszawa 1984.
- [6] K.Malinowski, A.Karbowski - Hierarchiczna struktura sterowania falą powodziową w dorzeczu Górnej Wisły, materiały konferencyjne.

ANALOG SIMULATOR OF FLOOD WAVE TRANSFORMATION

IN UPPER VISTULA RIVER SYSTEM

S u m m a r y

The concept of a flood wave analog simulator interfaced to digital minicomputer is given. This device can provide very fast and convenient tool for computing flood wave transformation. The particular design as developed in the Institute of Automatic Control, together with specialized software, is presented. The results of analog simulation /which takes about 0,8 sec. when compared to 90 sec. digital simulation/ show this concept to be valuable.

АНАЛОГОВЫЙ СИМУЛЯТОР ТРАНСФОРМАЦИИ
ВОЛНЫ НАВОДНЕНИЯ В БАССЕЙНЕ ВЕРХНЕЙ ВИСЛЫ

Р е з ю м е

В работе представляется идея и принципы реализации аналогового симулятора трансформации волны наводнения, работающего вместе с микрокомпьютером. Эта установка позволяет на очень быстрые вычисления результатов трансформации. Проект разработан в Институте Автоматики, вместе с программным обеспечением. Результаты аналоговой симуляции, выполняемой в течение 0,8сек. по сравнению с 90 сек. цифровой симуляции, являются очень полезными.