



Polska Akademia Nauk • Instytut Badań Systemowych

Michał Inkielman

**SYMULACYJNE METODY
ANALIZY STEROWANYCH
WIELOZBIORNIKOWYCH
SYSTEMÓW WODNYCH**



SYMULACYJNE METODY ANALIZY STEROWANYCH
WIELOZBIORNIKOWYCH SYSTEMÓW WODNYCH

Polska Akademia Nauk • Instytut Badań Systemowych

Seria: BADANIA SYSTEMOWE
tom 19

Redaktor naukowy:

Prof. dr hab. Jakub Gutenbaum

Warszawa 1995

Michał Inkielman

**SYMULACYJNE METODY
ANALIZY STEROWANYCH
WIELOZBIORNIKOWYCH
SYSTEMÓW WODNYCH**

Publikację opiniowali do druku:

Prof. dr hab. Zdzisław Kaczmarek
Prof. dr hab. Krzysztof Malinowski

Wydano z wykorzystaniem dotacji
KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN
Warszawa 1995

ISBN 83-85847-31-6
ISSN 0208-8029

WPROWADZENIE

Praca niniejsza stanowi opracowanie syntetyczne badań nad zastosowaniem metod obliczeniowych i symulacyjnych do rozwiązywania zadań sterowania zasobami wodnymi w skali regionalnej w horyzoncie rocznym i wieloletnim. Celem pracy jest przedstawienie metodologii modelowania systemowego w zastosowaniu do specyficznego kręgu zagadnień sterowania: sterowania systemem wodnym, który jest systemem hydrologicznym, ekonomicznym, technicznym i ekologicznym równocześnie. Wyniki zaadresowane są z jednej strony do specjalistów z dziedziny gospodarki wodnej, przedstawiając komputerowe narzędzie wspomagania decyzji - a z drugiej do twórców softwaru, analizując realne wymagania obiektu, jakim jest system wodny. W pracy omówiono system wodny jako obiekt sterowania oraz cele, narzędzia i sposoby oceny efektywności sterowania. Szczególną uwagę poświęcono analizie metod sterowania opartych na koncepcji tzw. reguł decyzyjnych i zagregowanych modeli optymalizacyjnych oraz ich weryfikacji na drodze symulacji. Rozważane są problemy skuteczności reguł sterowania ocenianych z punktu widzenia różnorodnych kryteriów, w tym także z punktu widzenia wpływu sterowania ilościowego zasobami na parametry jakości wody.

Omówiono zastosowania skojarzonej metody badania: sterowanie-optymalizacja-symulacja, a w szczególności: wykorzystanie reguł decyzyjnych do budowy zagregowanych modeli systemu wodnego w fazie projektowej (np. do wymiarowania zbiorników), wykorzystanie reguł decyzyjnych jako podstawy sterowania bieżącego, wykorzystanie reguł decyzyjnych do prognozowania przepływów przy obliczaniu parametrów jakości wody.

Omówiono także zagadnienia praktyczne związane z budową pakietu komputerowego realizującego zadania konstruowania modeli symulacyjnych, generowania scenariuszy symulacji i analizy wyników. Przy konstrukcji modeli symulacyjnych wykorzystano obiektowo zorientowaną strukturę programu komputerowego i topologię sieci systemu wodnego. Podejście to pozwala formułować modele różnych elementów systemu na dowolnym poziomie szczegółowości, rozwijać je lub agregować, w zależności od potrzeb i dostępności danych, bez potrzeby zmian w programie wykraczających poza lokalny opis tych elementów (obiektów).

W opracowaniu wykorzystano wyniki badań prowadzonych w IBS PAN od 1976 roku w ramach programu PR-7, wspólnych badań z IIASA (Projekt Górnej Noteci), programu CPBP 03.09 (z wykorzystaniem danych dotyczących regionu Górnej Wisły), własnych badań autora między innymi w Instytucie Informatyki Uniwersytetu w Annabie (Algieria) w latach 1981 - 1986 związanych z modelowaniem systemu wodnego przemysłowo-rolniczego regionu Annaby oraz prac autora związanych z budową i wykorzystaniem pakietu symulacyjnego w temacie IBS PAN "Modelowanie i optymalizacja dla potrzeb sterowania ilością i jakością wody".

1. WSTĘP

Naturalne sieci wód powierzchniowych złożone z rzek i jezior, uzupełnione przez urządzenia techniczne do przesyłania i magazynowania wody, ujęcia wody podziemnej i użytkownicy wody tworzą złożone systemy wodno-gospodarcze. Systemy takie spełniają ważne funkcje w życiu ekonomicznym i społecznym każdego kraju. Dla Polski sprawa efektywnego działania systemów wodno-gospodarczych jest szczególnie istotna ze względu na okresowy ostry deficyt wody oraz dużą nierównomierność opadów jako głównego źródła zasobów wodnych, przy stosunkowo niskim stopniu zagospodarowania zasobów zarówno przez duże zbiorniki jak przez tzw "małą retencję".

W ostatnich latach zmiany gospodarcze w Polsce sprzyjają bardziej racjonalnemu spojrzeniu na gospodarkę wodną. Dał temu wyraz Komitet Gospodarki Wodnej PAN opracowując w porozumieniu z Ministerstwem Ochrony Środowiska w 1993 roku założenia "Polityki gospodarowania zasobami wodnymi w Polsce". U podstaw tego spojrzenia są następujące elementy: traktowanie wody jako towaru o określonej wartości ekonomicznej, powiązanie problemu sterowania zasobami wodnymi z regionalnymi ekosystemami i jednostkami hydrograficznymi, połączenie procesów decyzyjnych z odpowiedzialnością za ich skutki w postaci zmian zasobów wodnych i jakości wody w celu minimalizacji tych zmian oraz ciągły monitoring skutków gospodarowania.

Wpływ działalności gospodarczej i bytowej, prowadzonej na określonym obszarze, na zasoby wodne, wyraża się w kilku zasadniczych parametrach:

- zużycie zasobów powierzchniowych zgromadzonych w zbiornikach,
- zużycie wód powierzchniowych przez ograniczenie spływu naturalnego
- zmiana równowagi w bilansie płytkich wód gruntowych, głównie w wyniku działalności budownictwa i kanalizacji (znaczny udział miały tu melioracje)
- eksploatacja zasobów wód podziemnych,
- zrzut zanieczyszczeń (ścieków) do zbiorników i rzek
- zanieczyszczenie gleby i wód podziemnych
- neutralizacja zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych

Łączny efekt wszystkich tych składników oddziaływania na zasoby wodne jest zależny nie tylko od wielkości każdego z nich, ale także od synergicznego działania ich kombinacji w połączeniu z indywidualnymi warunkami hydrologicznymi i hydrotechnicznymi.

W związku z tym, ocena obciążenia, jakie stanowi działalność gospodarcza w dziedzinie zasobów wodnych, nie może być oparta jedynie na pomiarze

każdego z tych parametrów, lecz musi uwzględniać rzeczywiste skutki jakie ma ona dla środowiska hydrologicznego danego obszaru i obszarów przyległych.

Badanie niewątpliwie szkodliwych skutków działalności, która z drugiej strony jest niezbędna (potrzeby bytowe mieszkańców) lub pożądana ze względów ekonomicznych, wprowadza elementy oceny wielokryterialnej. Miara skutków działalności fabryki, określona masą zanieczyszczeń wprowadzonych do rzeki lub ilością zużytej wody jest dopiero wtedy użyteczna, jeśli przeciwstawiając jej finansowy zysk gospodarza zasobów wodnych z tytułu opłat lub podatku potrafimy powiedzieć, czy wynik ogólny jest korzystny, czy nie. W większości przypadków odpowiedź nie jest jednoznaczna.

W tego typu sytuacjach wydaje się celowe wprowadzenie wskaźników relatywnych. Relatywizm ten powinien opierać się zarówno na porównaniu skutków działalności użytkownika wody z analogicznymi skutkami podobnej działalności na innych obszarach, jak i porównaniu różnych okresów danej działalności. Warunkiem koniecznym do takiej oceny jest zarówno opracowanie systemu normatywów jak pełna ewidencja stanu zasobów i ich zużycia w ciągu szeregu lat (statystyki deficytów, przekroczeń rozmaitych ograniczeń ilościowych i jakościowych).

W przypadku najczęściej spotykanym system wodny służy zaspokojeniu potrzeb wielu użytkowników, często o przeciwstawnych celach i wobec ograniczenia zasobów pozostających w stałym konflikcie. Stąd powstaje konieczność wyodrębnienia układu sterowania (dyspozytora wody), którego zadaniem jest minimalizowanie skutków użytkowania wody przy równoczesnym zaspokojeniu potrzeb użytkowników.

Efektywność wykorzystania zasobów wodnych w istniejących urządzeniach zależy od decyzji dotyczących zarówno gromadzenia wody w zbiornikach, jak i jej rozdziału między użytkowników. Należy przy tym podkreślić, że nawet jeśli decyzje takie dotyczą pojedynczych zbiorników, czy użytkowników, to ze względu na powiązania systemowe, oddziałują one nie tylko lokalnie, lecz wpływają na stan całego systemu. Wobec tego powinny być podejmowane z uwzględnieniem tego wpływu - w ramach określonego zadania globalnego.

Z szerokiego zakresu zagadnień związanych z gospodarką wodną, obejmującego zarówno aspekty ilościowe, jak i jakościowe, w tej pracy ograniczymy się do spraw dotyczących rozdziału zasobów wodnych w sieciach jedno i wielozbiornikowych w horyzoncie czasu obejmującym procesy sezonowe. Nawet przy takim zawężeniu tematyki mamy do czynienia z zagadnieniem złożonym i trudnym, co wynika z następujących cech systemu:

- system jest wielocelowy: przy podejmowaniu decyzji należy uwzględniać zarówno interesy bezpośrednich użytkowników wody t.j. gospodarki komunalnej, przemysłu, rolnictwa, jak i mieć na uwadze ryzyko powodzi,

względy ekologiczne i turystyczno-rekreacyjne, a także potrzeby transportu wodnego;

- decydujący wpływ na zachowanie się systemu mają czynniki losowe; dotyczy to zarówno opadów, stanowiących podstawowe źródło uzupełniania zasobów wodnych, jak i niektórych użytkowników, np rolnictwa;
- system jest wielowymiarowy ze względu na liczbę sterowanych zbiorników, ujęć wody dla różnorodnych użytkowników, rozproszenie terytorialne;
- system jest dynamiczny ze względu na zmienność w czasie zasobów i potrzeb wodnych oraz możliwość gromadzenia wody (retencję) w zbiornikach i glebie;
- próby formułowania dostatecznie ścisłych opisów matematycznych modeli systemu prowadzą do zależności nieliniowych ze względu na nieliniowość zjawisk spływu powierzchniowego, przepływu w rzekach, zależności poziomu zbiornika i objętości wody, transformacji zanieczyszczeń a także nieliniowe zależności efektów użytkowania wody od ilości dostarczanej.

Aby sterować siecią wodną uwzględniając różnorodne cele, często przeciwstawne, należy podejmować decyzje różnych rodzajów, mimo, że sterowanie odbywa się z reguły tylko przez oddziaływanie na określone przepływy. Decyzje te, przy uwzględnieniu horyzontu ich przyszłych efektów oraz przedziału czasu zbierania informacji, można podzielić ogólnie na trzy klasy: decyzje długoterminowe (inwestycje), średnioterminowe (zarządzanie) i krótkoterminowe (sterowanie operacyjne).

Decyzje pierwszego typu w znacznym stopniu są zależne od kontekstu gospodarczego sieci wodnej i rzadko mogą być podejmowane wyłącznie na podstawie charakterystyk systemu wodnego. Tym niemniej sposoby zarządzania i sterowania operacyjnego wpływają istotnie na efektywność decyzji inwestycyjnych. Stąd wynika potrzeba takiego formułowania procesów decyzyjnych średnio- i krótkoterminowych, które umożliwiło by aprioryczną ocenę właściwości systemu wodnego łącznie z systemem zarządzania i sterowania już na etapie podejmowania decyzji inwestycyjnych.

Podobna sytuacja powstaje również wówczas, gdy chcemy uwzględnić wpływ mechanizmu sterowania operacyjnego na efektywność zarządzania. W niniejszej pracy, jeśli mówimy o modelach sterowania operacyjnego, to z reguły mamy na myśli te jego cechy, które są istotne przy podejmowaniu decyzji średniookresowych.

Nawet dla prostej struktury sieci wodnej i niewielkiej liczby użytkowników zadanie o wspomnianych cechach nie daje się ściśle rozwiązać znanymi metodami. Toteż wszystkie dotychczasowe próby rozwiązań poprzedzane są uproszczeniami, bądź istotnie ograniczającymi założeniami. Najbardziej naturalne wydają się w tej sytuacji takie uproszczenia, które przyjmowano również w tradycyjnej praktyce sterowania zbiornikami i poborami użytkowników: dotychczas sterowanie zbiornikami było zwykle oparte

o wykresy lub tabele przedstawiające w sposób graficzny lub numeryczny pewne "reguły decyzyjne" realizowane w określonych przedziałach czasu lub w chwilach wystąpienia określonych zdarzeń. Przy analitycznych próbach określenia optymalnego rozrządu wody w złożonym systemie, reguły te można zapisać także analitycznie. Zadanie optymalizacji rozrządu wody można wtedy ograniczyć do wyznaczenia optymalnych wartości parametrów przyjętych reguł decyzyjnych. Ze względów obliczeniowych zadanie powyższe jest formułowane jako dyskretne w czasie, ale i w praktyce sterowanie zaporą wodną stanowi realizację planu uaktualnianego okresowo. Liczne reguły decyzyjne proponowane w publikacjach przez ostatnie 20 lat różnią się zarówno zakresem informacji wejściowej, sposobem jej wykorzystania, jak też liczbą parametrów dobieranych z uwagi na cele sterowania.

Teoria sterowania, dla pewnych klas obiektów i celów sterowania, dysponuje metodami, które umożliwiają syntezę reguł w formie algorytmu sterowania (regulatora). Algorytm taki jest najczęściej deterministyczny w tym sensie, że przy określonym stanie obiektu i ewentualnie mierzonych zakłóceniach zewnętrznych reakcja regulatora jest jednoznaczna, uwalniając człowieka od podejmowania decyzji. Regulator wraz z obiektem tworzy układ zamknięty o możliwych do określenia a priori charakterystykach.

W systemach wodnych, ze względu na ich złożoność (wielowymiarowość, wielokryterialność i stochastyczność) nie ma możliwości analitycznej syntezy regulatora. Z tych samych powodów, a w szczególności ze względu na wielokryterialność, nie buduje się automatycznych układów sterowania systemami wodnymi. Stosowane algorytmy sterowania, noszące zwykle nazwę reguł decyzyjnych, określają tylko propozycje wariantów decyzji, które są ewentualnie realizowane pod kontrolą człowieka (systemy wspomaganie decyzji - decision support systems) np. [92], [93].

W rzeczywistym systemie wodnym mamy najczęściej do czynienia ze sprzecznością pomiędzy wymaganiem prostoty reguł decyzyjnych ze względu na możliwości optymalizacji ich parametrów, a ich realizowalnością w warunkach silnej losowej zmienności zasobów wodnych i ograniczeń fizycznych dotyczących zbiorników i cieków.

Jednym ze sposobów pokonania tej trudności w zadaniach magazynowania i rozrządu wody jest zastosowanie specjalnego rodzaju programowania stochastycznego - zadania z ograniczeniami na prawdopodobieństwa (chance constrained programming). Wiąże się to z przyjęciem w zadaniu stochastycznej postaci ograniczeń jako ograniczeń na prawdopodobieństwa, że sterowane odpływy ze zbiorników oraz ich napełnienia nie przekroczą odpowiednich zakresów. Gdy postać przyjętych w zadaniu rozrządu reguł decyzyjnych jest liniowa, takie podejście ma istotną zaletę: opis sieci wodnej wyłącznie równaniami bilansowymi i liniowymi regułami decyzyjnymi (LRD) daje

możliwość sprowadzenia zadania optymalizacji do programowania liniowego. Stochastyczne ograniczenia uzasadniają zaniechanie w rachunku optymalizacyjnym rzadkich przypadków (ze względu na ograniczone ich prawdopodobieństwo) nierealizowalności LRD wynikającej z ograniczeń fizycznych.

Po raz pierwszy takie rozwiązanie zadania w zastosowaniu do sieci wodnych zaproponowali C.S.ReVelle, E.Joeres i W.Kirby w 1969 roku [71], dla pojedynczego zbiornika i w zasadzie do celów projektowania jego pojemności.

W niniejszej pracy krótko opisano tę metodę, a także przedstawiono jej rozszerzenie dla systemów wielozbiornikowych i zastosowanie do optymalizacji rozrządu wody. W IBS PAN prace w tym kierunku były prowadzone w latach 1978 - 1986 [23], [25], [26], [65], [66]. Pokazano, że reguła Revelle'a może być traktowana jako szczególny przypadek, z dość licznej grupy reguł, dla których możliwe jest podejście analityczne [35].

Rozwiązania uproszczonego problemu powinny być jednak sprawdzone symulacyjnie na pełniejszym modelu. Szczególnie potrzebne jest sprawdzenie skutków ingerencji ograniczeń fizycznych, pominiętych w zadaniu optymalizacji, w działanie liniowej reguły decyzyjnej. Ponadto, ograniczenia stochastyczne są czasami wprowadzane do zadania sztucznie, w celu ustalenia obszaru rozwiązań w liniowym zakresie założonej reguły, ze względów tylko obliczeniowych. Wtedy warto sprawdzić symulacyjnie, czy realizacja reguł poza liniowym zakresem nie spowoduje nieprzewidzianych i niepożądanych skutków.

W latach 1970 - 1985 ukazało się wiele prac poświęconych różnym odmianom i modyfikacjom liniowych reguł decyzyjnych (LRD) [72], [17], [73], [74], [75], [60]. W większości przypadków modyfikacje mające na celu poprawę efektywności reguły odbierały jej cechę analityczności zadania optymalizacji lub zmuszały do ryzykownych estymacji statystycznych lub do stosowania metod bezpośredniej optymalizacji na modelu symulacyjnym.

Wybrane arbitralnie LRD mają postać uzasadnioną głównie względami obliczeniowymi optymalizacji i nie ma podstaw do uznania ich za najkorzystniejsze z punktu widzenia celów sterowania. Jedyne badania symulacyjne pozwalają oceniać efektywność sterowania z punktu widzenia dowolnych kryteriów - także tych, których wprowadzenie do wskaźnika optymalizacji byłoby niemożliwe ze względów obliczeniowych. Próby syntezy reguł bardziej złożonych, nieliniowych, bardziej heurystycznie uzasadnionych, również dają się zweryfikować jedynie przez badania symulacyjne. Rezygnując z postaci reguł sterowania umożliwiających analityczne określenie charakterystyk układu zamkniętego obiekt-sterowanie oraz ze stałookresowej dyskretyzacji czasu, dysponujemy bogatym zbiorem reguł nieliniowych, także o postaci nie analitycznej - w formie tablic lub krzywych dyspozytorskich (np.: [1], [3], [68], [80], [89]).

Często, szczególnie w przypadku systemów wodnych o dużej liczbie elementów sterowanych, synteza regulatorów związana jest z hierarchicznym podejściem do zadania sterowania: sterowanie bezpośrednie realizowane jest przez reguły lokalne, natomiast parametry tych reguł są optymalizowane z punktu widzenia zadań globalnych. Koncepcja LRD z optymalizowanymi parametrami w sposób naturalny odpowiada takiej właśnie dwupoziomowej strukturze sterowania. W hierarchizacji sterowania można jednak pójść jeszcze dalej. Można przyjąć (i tak w praktyce jest to robione), że reguła decyzyjna dotycząca sterowań okresowych stanowi tylko ramowy i uproszczony program sterowania, np. określający zasoby wody przeznaczone dla użytkowników w danym okresie czasu, natomiast szczegółowe decyzje operacyjne (np. harmonogram rozdziału zasobu między różnych odbiorców) wypracowywane są przy użyciu bardziej szczegółowych i wyspecjalizowanych algorytmów. W IBS PAN tego typu prace dotyczyły rozdziału wody między użytkowników obszaru rolniczego: [23], [9], [90] - zadanie dyskretnej LRD pozwala określić ilość wody dostarczanej z danymi gwarancjami dla obszaru rolniczego w danym okresie czasu, a lokalne zadanie optymalizacji służy do określenia harmonogramu rozdziału tej wody między różne uprawy. W literaturze dotyczącej ogólnych zagadnień optymalizacji można znaleźć wiele przykładów hierarchicznych struktur zadania sterowania systemami wodnymi, szczególnie dla systemów zbiorników energetycznych - z reguły dla bardzo uproszczonych, idealizowanych modeli deterministycznych.

Niezależne od przyjętej koncepcji sterowania i metod syntezy tego sterowania, podstawowym warunkiem efektywności decyzji sterujących jest oparcie procesu decyzyjnego o prawidłowo sformułowany model obiektu i jego zadań. Modelowanie systemów jako zbiór ogólnych metod opisu i analizy badanych procesów jest przedmiotem obszernych monografii (np. [22]). W przypadku problemów praktycznych, szczegółowy opis systemu sterowanego w języku umożliwiającym matematyczną formalizację jest na ogół pierwszym i z reguły pracochłonnym etapem pracy [11], [16], [20], [32], [51], [70], [79]. Najtrudniejsze elementy tej formalizacji to hipotezy dotyczące stochastycznego charakteru głównych składników bilansu wody: dopływów i poborów, zależności wiążących parametry jakości wody oraz hipotezy dotyczące kryteriów oceny systemu. Weryfikacja tych hipotez, niezależnie od tego, czy prowadzą one do modeli analitycznych, czy nie, wymagać może eksperymentów symulacyjnych.

Często problemem jest nie tylko identyfikacja nieznanymi parametrów złożonego procesu hydrologicznego, ale także dostatecznie jednoznaczne wyartykułowanie a priori potrzeb i priorytetów użytkowników wody. W rezultacie, dopiero dialogowe procedury konstruowania modeli w systemach eksperckich umożliwiają sformułowanie zadań sterowania [56], [57], [93].

Badanie efektywności sterowania systemu wodnego za pomocą symulacji według określonych scenariuszy jest często jedynym rozwiązaniem w przypadku występowania istotnej niestacjonarności na przykład wywołanej założonym rozwojem systemu (np. monotoniczny wzrost zapotrzebowania na wodę przez rozbudowywane systemy nawodnień rolniczych lub zmiana kryterium jakości sterowania [70], [95]), choć i tym przypadku możliwe jest repetycyjne stosowanie metod analitycznych (np. [24]).

Znaczenie badań symulacyjnych w każdym z opisanych wyżej przypadków, skłania do opracowania odpowiednich narzędzi komputerowych pozwalających prowadzić te badania łatwo i efektywnie.

W dalszej części pracy opisano pakiet programów symulacyjnych pozwalający, za pomocą prostego języka rozkazów, lub w formie dialogowej, realizować dowolne scenariusze symulacji. Omawiany pakiet programów został opracowany jako narzędzie do badania efektów stosowania określonych reguł decyzyjnych sterowania systemami wodnymi w skali regionalnej lub krajowej (sieci zawierające zbiorniki retencyjne, odcinki rzek i kanały).

Efekty te związane są zarówno z kształtowaniem zasobów wody gromadzonych w zbiornikach, regulowaniem przepływów w sieci (w szczególności w punktach poboru wody przez użytkowników) w warunkach silnych wahań losowo zmiennych dopływów i poborów jak i potrzebą utrzymania stopnia zanieczyszczenia wody (ze źródeł punktowych i rozproszonych) na dostatecznie niskim poziomie. Najprostszym sposobem uwzględnienia tego ostatniego czynnika jest zapewnienie odpowiedniego rozcieńczenia ścieków przez określenie minimalnych przepływów w gałęziach sieci (tzw. przepływ nienaruszalny). Jednakże złożona dynamika transformacji zanieczyszczeń, możliwość kumulowania ich w zbiornikach, zmienność w czasie i niejednorodność w przestrzeni skłaniają do bardziej szczegółowej analizy ilościowej zależności parametrów jakościowych wody od sterowania przepływem.

Programy symulacyjne ECOSYM zostały zbudowane na bazie elementów pakietu SYMWOD zastosowanego w badaniach prowadzonych w IBS PAN w latach 1985 - 1990 w ramach programu CPBP 03.09 temat 7.06 [69]. Pakiet SYMWOD, którego części składowe oraz wyniki prób uruchomieniowych były już wcześniej prezentowane [36], [37], [34], [35], [33], został opracowany tak, aby mógł być zastosowany do systemów wodnych o możliwie ogólnej postaci. Przewidziano możliwość modelowania kanałów przerzutowych lub rurociągów z pompowniami, sieci rozgałęzionych o odwrotnej strukturze dendrytowej i pętli. W modelach elementów sieci i bilansach ogólnych parametry jakości wody były jednakże pominięte.

Podjęta w latach 1991 - 92 rozbudowa pakietu polegała na trzech zasadniczych modyfikacjach:

1) zmiana struktury danych do postaci stosowanej w językach programowania obiektowego (gałęzie i węzły sieci są reprezentowane przez struktury danych zawierające zarówno parametry liczbowe jak i zmienne proceduralne (metody) opisujące algorytmy działania tych obiektów) - co zapewnia niezależność struktury programu symulacyjnego od postaci i zbioru elastycznych modeli cząstkowych,

2) przepływy w gałęziach i stany zbiorników stają się zmiennymi wektorowymi, których składowymi, obok ilości wody, są wybrane parametry jakościowe.

3) bilanse wody w sieci należy uzupełnić modelami transformacji zanieczyszczeń w poszczególnych jej elementach.

Pierwszy kierunek modyfikacji miał na celu ułatwienie implementacji pakietu, będącego z założenia dość uniwersalnym narzędziem, do symulacji konkretnych systemów o różnorodnych cechach. Pozostałe modyfikacje wynikają z przewidywanego zakresu problemów gospodarki wodnej i fizycznych cech modelowanych systemów. W ogólnym przypadku zakłada się więc, że oprócz modeli bilansów ilościowych, będziemy uwzględniać modele transformacji zanieczyszczeń w zbiornikach i w ciekach, należące do trzech głównych typów: zanieczyszczenia ulegające rozkładowi, zawiesiny podlegające sedymentacji, zanieczyszczenie nie ulegające transformacji (jedynie rozcieńczalne)

Istotną cechą pakietu jest możliwość równoczesnego eksperymentowania z różnymi algorytmami sterowania przepływami sieci (model ilościowy) i modelami transformacji zanieczyszczeń w różnych elementach systemu.

Posługując się pakietem podjęto jakościowe badania symulacyjne problemów takich, jak:

- śledzenie rozprzestrzeniania się w systemie wodnym zanieczyszczeń z określonych źródeł,
- badanie wpływu strategii gromadzenia wody w zbiornikach na kumulację zanieczyszczeń (np. osadów),
- analiza skuteczności samooczyszczania w kaskadach zbiorników,
- badanie możliwości wykorzystania rezerw wody w zbiornikach do rozcieńczania okresowych dużych zrzutów zanieczyszczeń,
- badanie wpływu lokalizacji punktów zrzutu ścieków i oczyszczalni na rozkład przestrzenny stężeń zanieczyszczeń w sieci,
- badanie ograniczającego wpływu wymagań jakości wody na obszar rozwiązań dopuszczalnych zadania rozrządu (sterowania ilością).

W opracowanym pakiecie zachowano (a nawet rozbudowano w stosunku do pakietu SYMWOD) funkcje pomocnicze związane z przygotowaniem danych do symulacji i opracowywaniem wyników, usprawniające prowadzenie eksperymentów symulacyjnych.

W charakterze ilustracji przytoczono wyniki symulacji przykładowych systemów wodnych, których charakterystyki oparto na danych dotyczących rzeczywistych systemów wodnych, a reguły sterowania były dobierane. Badano przypadek liniowej reguły decyzyjnej uprzednio poddanej optymalizacji [35]. Badano wpływ informacji wejściowej reguły decyzyjnej przy arbitralnie wybranej strukturze reguły [27], [35]. Omówiono także wyniki symulacji przy sterowaniu wg wybranych nieliniowych reguł heurystycznych.

W tak szerokim kręgu zagadnień poruszanych w pracy myślą przewodnią autora było określenie granicy stopnia komplikacji stosowanych modeli, po za którą metody analityczne muszą ustąpić przed metodami symulacyjnymi. Stąd, w omawianych modelach często pojawiają się założenia mogące budzić sprzeciw (także samego autora), których akceptacja lub odrzucenie decyduje o "analityczności" sformułowania problemu. Rezygnacja z metod analitycznych - preferowanych z racji ogólności wyników i niskich kosztów stosowania - będzie z reguły wynikiem konieczności przekroczenia tej granicy z powodu niedopuszczalności określonych uproszczeń modelu. W tym kontekście rozbudowany model symulacyjny w połączeniu z badaniami analitycznymi modelu uproszczonego służy do testowania skutków uproszczeń, a w przypadku ich niedopuszczalności umożliwia poszukiwanie rozwiązań metodą symulacji.

Praca, będąc monograficznym podsumowaniem wieloletnich zespołowych badań prowadzonych w IBS PAN od 1976 roku w ramach programu PR-7, wspólnych badań z IIASA (Projekt Górnej Noteci), programu CPBP 03.09 (z wykorzystaniem danych dotyczących regionu Górnej Wisły), własnych badań autora między innymi w Instytucie Informatyki Uniwersytetu w Annabie (Algieria) w latach 1981 - 1986 związanych z modelowaniem systemu wodnego przemysłowo-rolniczego regionu Annaby oraz prac autora związanych z budową i wykorzystaniem pakietu symulacyjnego w temacie IBS PAN "Modelowanie i optymalizacja dla potrzeb sterowania ilością i jakością wody".

Samodzielny dorobek autora stanowią: model sieci wodnej uwzględniający rozprzestrzenianie zanieczyszczeń i realizujący go pakiet symulacyjny - większość rozdziału 2 i rozdział 6, analiza kryteriów ilościowych i jakościowych użytkowania wody, krytyczna analiza skuteczności liniowych reguł decyzyjnych w zastosowaniu do systemów wielozbiornikowych, propozycja reguły wielozbiornikowej (p.5.5), klasyfikacja reguł sterowania zbiornikami z punktu widzenia wykorzystywanej informacji wejściowej. W numerycznych przykładach autor wykorzystał własne obliczenia dla danych z Algierii, a dla zespołowo badanego przykładu Górnej Wisły przeprowadził analizę statystyczną oceniającą poprawność przyjętego modelu dopływów i interpretującą wyniki optymalizacji reguły liniowej i wyniki symulacji. Jego autorstwa jest także wykorzystanie podejścia heurystycznego do opracowania reguły łączącej cechy reguły standardowej z wynikami optymalizacji reguły liniowej - tzw. "reguła oszczędnościowa".

6. PAKIET KOMPUTEROWY SYMULACJI SYSTEMÓW WODNYCH

6.1. Podstawowe funkcje pakietu

Przy analizie złożonych systemów wodnych zarówno na etapie ich projektowania jak i sterowania, modele symulacyjne odgrywają dużą rolę. Modele tych systemów, w dostatecznym stopniu uwzględniające ich wielowymiarowość, nieliniowość i wielokryterialność wraz ze stochastycznym charakterem zasobów i potrzeb wodnych i różnorodnością kryteriów oceny, są zwykle tak złożone, że bezpośrednie analityczne metody ich optymalizacji są mało użyteczne. Wówczas modele symulacyjne mogą być wykorzystywane, bądź do weryfikacji rozwiązań analitycznych modeli uproszczonych, bądź do poszukiwania rozwiązań drogą pośrednią przez wielokrotną symulację.

Podstawowym zadaniem pakietu jest symulacja działania systemu wodnego. Zadanie to realizuje program, który w przyspieszonej skali czasu śledzi przebieg procesów zachodzących w dynamicznym modelu systemu. Przy budowie modułu symulacyjnego przyjęto założenie o dyskretyzacji czasu (przy założeniu wieloletniego horyzontu czasu i cykliczności procesów z okresem 1 rok, minimalny okres dyskretyzacji wynosi 7 - 10 dni), oraz przyjęto sieciowy model systemu wodnego, w którym poszczególne węzły i gałęzie odpowiadają zagregowanym elementom sieci rzeczywistej i są opisane przez odpowiednie zbiory parametrów skupionych.

Algorytm obliczeń symulacyjnych zawiera mechanizm poszukiwania iteracyjnie rozwiązania dla sieci z pętlami oraz realizację dwutorowości obliczeń symulacji systemu wodnego i symulacji procesu decyzyjnego (reguł decyzyjnych). Dwutorowość ta wynika z faktu, że w większości przypadków reguły decyzyjne korzystają nie tylko z informacji o stanie systemu, ale i z prognoz (np. wartości oczekiwanych) i nie zawsze są realizowalne w konkretnej sytuacji. Poza tym reguły decyzyjne mogą być tworzone przy założeniu ograniczonego dostępu do informacji o całym systemie (np. nieznaności decyzji w innych punktach sieci), natomiast rozwiązanie symulacyjne musi spełniać wszystkie równania więzów modelu.

W celu ułatwienia komunikacji operatora z modelem dobudowano procedury konwersacyjne i graficzne wykorzystywane zarówno na etapie wprowadzania danych jak i opracowywania wyników. Przed rozpoczęciem właściwej symulacji, odpowiednie programy pozwalają utworzyć żądany scenariusz, zawierający ciągi zmiennych wejściowych egzogenicznych dla wybranego horyzontu czasu, szczegółowy opis elementów sieci i ich powiązań oraz reguły

(algorytmy) sterowania przepływami. Scenariusz symulacji jest uzupełniony listą wielkości, które należy obserwować i rejestrować wraz z zestawem procedur do obliczanie wskaźników statystycznych i innych kryteriów.

Aby spełnić te zadania, modele symulacyjne muszą być uzbrojone w odpowiednie środki techniczne oprogramowania komputerowego (interfejs) tak, aby była możliwa prosta manipulacja danymi, parametrami i wynikami obliczeń. Wygodnym, nowoczesnym narzędziem może być w tym przypadku zintegrowany pakiet programów komunikujących się między sobą przez zbiory dyskowe (lub, w przypadku aktualnie stosowanych komputerów PC z rozszerzoną pamięcią operacyjną, przez wspólne obszary pamięci), wyposażony bogato w procedury konwersacyjne "przychylne" dla użytkownika¹.

6.2. Struktura podstawowego modelu symulacyjnego i reprezentacja programowa jego elementów

Topologia sieci

Rzeczywista struktura systemu wodnego jest reprezentowana w modelu przez graf zorientowany, którego wierzchołkami są węzły wodne z pojemnością (zbiorniki) lub bez pojemności, a łukami odcinki rzek, kanały i rurociągi łączące węzły i charakteryzujące się przepływem różnym od zera. Część gałęzi reprezentuje zasilania ze źródła wody, a część pobory użytkowników i inne odpływy z sieci do tzw. węzła pochłaniającego. Podstawowy opis matematyczny takiego grafu zawiera równania ciągłości strumieni uzupełnione bilansami zbiorników. W celu umożliwienia znalezienia rozwiązania sieci, równania bilansowe węzłów muszą być uzupełnione odpowiednią liczbą równań określających przepływy gałęziowe (w ogólnym przypadku mogą to być nieliniowe funkcje stanu węzłów i przepływów w innych gałęziach. Mimo, że graf naturalnego systemu wodnego nie zawiera cykli, modelowana struktura powinna dopuszczać cykle z uwagi na możliwość występowania w praktyce przepompowni tworzących zamknięte pętle przepływu wody. Programowy opis powyższej struktury jest klasyczny: stosujemy tablice połączeń lub listy. W tym

¹ Pojęcie "przychylności" dla użytkownika podlega w ostatnich latach bardzo szybkim, niemal rewolucyjnym, zmianom. Wzrost szybkości obliczeniowej komputerów, coraz niższy koszt pamięci umożliwiają tworzenie programów użytkowych z pełnym interfejsem graficznym, np., w środowisku WINDOWS. Omawiany pakiet został opracowany dla małych komputerów (np. PC AT) z systemem operacyjnym DOS. Dlatego w naszym przypadku "przychylność" dla użytkownika oznacza raczej możliwość interaktywnej współpracy z programem, możliwość śledzenia przebiegu symulacji i korygowania błędów, niż komfort graficznych obrazów na ekranie monitora.

ostatnim przypadku dla sieci dendrytowej można wprowadzić listy jednokierunkowe, a w przypadku ogólnym wygodniej jest posługiwać się listami dwukierunkowymi: dla każdego węzła określamy listę gałęzi wejściowych i wyjściowych, z których każda ma określony węzeł odpowiednio wejściowy lub wyjściowy. Ten dość prosty model systemu wodnego komplikuje się znacznie, gdy uwzględnimy w nim nie tylko ilość wody w sieci, ale również jej poziom zanieczyszczeń.

Zbiorniki

Model zbiornika zawiera przede wszystkim zależności określające bilans ilościowy wody (2.4), (2.5) określony przez:

- sumę strumieni wejściowych,
- sumę strumieni wyjściowych,
- straty na parowanie (2.5a) i inne,
- granice fizyczne lub umowne zmian stanu zbiornika, nie uwzględnione w podstawowym modelu matematycznym.

Modelując transformację strumieni w zbiornikach, zależnie od rodzaju zanieczyszczenia, kształtu i wielkości zbiornika i prędkości wymiany wody na skutek przepływu, należy uwzględnić ponadto następujące zjawiska:

- mieszanie na wejściu zbiornika dopływów o różnym poziomie zanieczyszczeń,
- mieszanie w zbiorniku strumienia wejściowego z wodą zmagazynowaną,
- transformacja zanieczyszczeń w czasie przebywania wody w zbiorniku,
- usuwanie zanieczyszczeń wraz z wodą przez wypływy ze zbiornika.

Wynika stąd, że potraktowanie w programie symulacyjnym zbiornika jako punktu węzłowego w sieci, poprawne z topologicznego punktu widzenia i użyteczne przy opisie struktury systemu, wymaga bardziej szczegółowej definicji węzła jako "obiektu" charakteryzującego się z kolei własną wewnętrzną strukturą danych i algorytmów - "metod".

Klasyfikacja obiektu jako "węzła" implikuje tylko niektóre z jego własności, takie jak: identyfikator węzła w sieci (nazwa lub numer), nie pusta lista strumieni wejściowych lub (i), lista strumieni wyjściowych. Dodatkowo z własności sieci przepływowej wynika określenie pojemności $S \geq 0$, określenie jednej zmiennej charakterystycznej dla wszystkich strumieni wejściowych i wyjściowych (ilość wody), która występuje w bilansie węzła.

W praktyce, chcąc w pełni określić własności węzła w procesie obliczeniowym, należy podać szereg algorytmów (metod), które będą zawierać informacje takie, jak:

1 - ustalenie zasady rozstrzygania konfliktu między ograniczeniami równościowymi i nierównościowymi lokalnymi dla strumieni wejściowych

i wyjściowych a ograniczeniami bilansu węzła ($0 \leq \text{stan} \leq S$) (wzory (2.6) - (2.8)a),

2 - zasady ustalania kolejności obliczania węzłów (w najprostszym przypadku identyfikator następnego węzła na liście),

3 - algorytmy transformacji różnych cech strumieni wejściowych w odpowiednie cechy węzła i strumieni wyjściowych (np. zależności (2.14) - (2.16) lub (2.18) - (2.20)).

Ponadto należy dla węzła określić szereg metod manipulacyjnych związanych z edycją jego parametrów, wprowadzaniem danych, wizualizacją i zapamiętywaniem wyników obliczeń i ewentualnie reprezentacją graficzną. W przypadku, gdy w modelu występuje wiele węzłów działających wg podobnych metod, możliwe jest stworzenie typu obiektu, który, przy nieznacznych tylko modyfikacjach w opisie poszczególnych reprezentantów, służy jako szablon dla wszystkich. Przy większych różnicach indywidualnych możemy tworzyć typy pochodne, dziedziczące większość cech od typu macierzystego. Na przykład, ze względu na różne definicje metod z grupy 1, 3 i niektórych metod manipulacyjnych, dla obiektu typu "węzeł" celowe jest tworzenie obiektów pochodnych typu "zbiornik" i "węzeł bez pojemności".

Dalsze precyzowanie metod prowadzi do definiowania typów obiektów, które mają pojedynczych reprezentantów w sieci: metody dotyczące transformacji zanieczyszczeń definiowane są jako modele dostosowane do indywidualnych konkretnych węzłów sieci.

Gałęzie sieci wodnej.

Dla prostej sieci przepływowej obiekty typu "gałąź" opisane są następującymi danymi:

- identyfikator (nazwa lub numer),
- identyfikatory węzła początkowego (wejścia) i końcowego (wyjścia),
- algorytm obliczania zmiennej bilansowanej (przepływu gałęzi),
- ograniczenia przepływu gałęzi.

Podobnie jak w przypadku węzłów, typy pochodne dla typu "gałąź" tworzy się, precyzując metody związane zarówno z obliczeniami modeli jak i metody manipulacji obiektami. Będziemy więc w dalszym ciągu rozróżniać "gałęzie sterowane" i "gałęzie nie sterowane" oraz "źródła", w zależności od metody definiującej przepływ.

Uwzględnienie transformacji strumienia (w szczególności składowych zanieczyszczeń) między wejściem i wyjściem gałęzi powoduje, że gałąź sieci wodnej opisana jest parą wektorów (dane strumienia na wejściu i dane na wyjściu) i algorytmy tej transformacji stanowią podstawę tworzenia dalszych podtypów pochodnych od obiektu "gałąź". Najprostszym typem gałęzi jest gałąź, w której transformacja nie zachodzi - do bardziej skomplikowanych

należy typ, w którym transformacja jest opisana równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Typ transformacji zależy bezpośrednio od rodzaju składowych wektora zanieczyszczeń uwzględnionych w modelu - w każdym spójnym podgrafie grafu przepływu obowiązuje jedna definicja tych składowych dla wszystkich gałęzi.

Obiekty programu (w języku Pascal Borland)

Zgodnie z powyższą koncepcją elementy sieci wodnej są reprezentowane przez obiekty następujących typów:

```
TW      = array[1..4] of real;
T5      = array[1..4,1..ILO] of real;
TZZ     = array[1..ZZ] of real;
T6      = array[1..2,1..5] of real;

      PolPtr = ^TZZ;           { wskaźnik wektora zanieczyszczeń }
      NodePtr = ^NodeRec;      { wskaźnik węzła }
      ArcPtr = ^ArcRec;        { wskaźnik gałęzi }
      ModelRef = ^ModelPol;    { wskaźnik funkcji transformacji
      zanieczyszczeń }
      ArcFunRef = ^ArcFunType; { wskaźnik modelu gałęzi }
      FlowRef = ^FlowType;     { wskaźnik funkcji przepływu }
      NodeDystrRef = ^NodeDystrType; { wskaźnik funkcji dystrybucji
      wypływu z węzła }

{ rekord zawierający pełną informację o ilości i jakości wody }
      water = record
      quant:real; {ilość wody - objętość lub objętość/miesiąc}
      pollut:PolPtr; { wskazanie wektora zanieczyszczeń }
      end;

{ rekord węzła w programie symulacyjnym }
      NodeRec = record
      numw:byte;           { numer porządkowy }
      inlet,outlet:array[1..4] of ArcPtr; { wskazania }
      { gałęzi dopływów i odpływów }
      nrr:NodeDystrRef;    { wskazanie funkcji rozdziału }
      { zasobów na wypływy }
      smodel:ModelRef;     { wskazanie modelu transf. }
      { zanieczyszczeń }
      next:NodePtr;        { następny liczony węzeł }
      case zbiornik:boolean of { typ węzła }
      true:(capacity:real; { pojemność }
      profil:T6;           { współczynniki kształtu }
      evapor:real;        { współczynnik parowania }
      StanPocz,Stan,StanPop:water; { stan zbiorn. }
      SMin,SMax,OgrS:real; { ograniczenia stanu }
      );
      false:();
      end;

{ rekord gałęzi w programie symulacyjnym }
      ArcRec = record
      num:byte;           { numer porządkowy }
      numf:word;         { numer funkcji przepływu }
      nrf:ArcFunRef;     { wskazanie funkcji przepływu }
      Top,Down:NodePtr; { wskazanie węzłów początku i końca}
      fmodel:ModelRef;   { wskazanie modelu transformacji }
      { zanieczyszczeń }
      wsp:TW;            { parametry funkcji przepływu }
      }
```

```

ster:boolean;      { rodzaj gałęzi          }
X_Prog,           { prognoza przepł. na końcu gałęzi }
XX,              { przepływ na początku gałęzi  }
X0,              { przepł. na początku gałęzi    }
                 { w poprzednim okresie          }
EX,              { wart. oczekiw. na końcu gałęzi }
EpX,             { j.w. dla poprzedniego okresu }
Y                :water;      { przepływ na końcu gałęzi      }
XMin,XMax,OgrX:real; { ograniczenia przepływu        }
end;

ModelPol          = procedure(kind:pollobj;var aqua:water);
                  { procedura transformacji zanieczyszczeń }
ArcFunType        = function(Arc:ArcPtr;prognoza:boolean):real;
                  { funkcja przepływu gałęzi          }
FlowType          = function(Arc:ArcPtr):real;
                  { funkcja przepływu                    }
NodeDystrType     = function(wezel:NodePtr;p:FlowRef;var wy,wyl:real):real;
                  { funkcja opisująca rozdział wody na wyjściu węzła }

```

gdzie *ILO* - liczba okresów w roku, *ZZ* - wymiar wektora liczonych zanieczyszczeń wody

Warto zwrócić uwagę na fakt, że zmienne określające stan zbiornika *Stan*, *StanPocz*, *StanPop* i przepływy w gałęzi *XX*, *X_Prog*, *X0* itd są typu *water*, a więc oprócz ilości wody reprezentują dowolnie zdefiniowany wektor zanieczyszczeń.

Dzięki powyższej strukturze opisu elementów, program obliczający sieć wodną w każdym kroku symulacji oraz realizujący kolejne kroki, może być zbudowany dla nie znanych z góry modeli tych elementów. Zmiana poszczególnych procedur np. reguł sterowania, może być dokonana nawet na bieżąco w trakcie obliczeń symulacyjnych bez konieczności kompilacji programu (jeśli korzystamy z jednej z wcześniej zdefiniowanych "metod").

W powyższych definicjach typów nie korzystano ze specyficznych struktur dostępnych w obiektowo zorientowanych wersjach języków Pascal czy C++, jednakże różnice podejścia są formalne, językowe, a nie pęciowe.

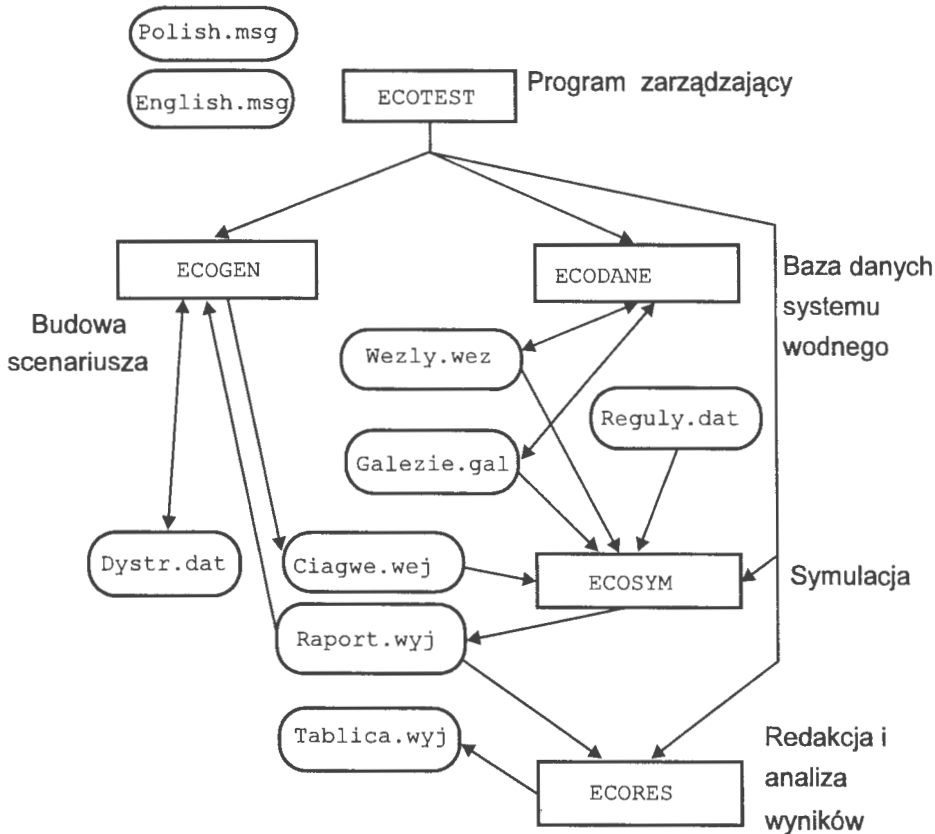
6.3. Programy składowe pakietu

Podstawowe programy pakietu spełniają następujące funkcje:

- przygotowanie zbiorów danych o strukturze sieci i jej elementach *ECODANE*,
- przygotowanie ciągów zmiennych losowych do scenariusza symulacji *ECOGEN*,
- symulacja *ECOSYM*,
- obróbka wyników symulacji *ECOBR*,
- rysowanie schematu sieci na podstawie opisu struktury *ECOFIG*,
- sporządzanie wykresów z pierwotnych lub przetworzonych wyników symulacji *ECOBR*.

W ostatecznej wersji programy tworzą pakiet zintegrowany, w którym zarządzanie zbiorami danych, uruchamianie symulacji oraz zmiany jej scenariusza (ze zmianami reguł decyzyjnych włącznie), a także typowe warianty analizy wyników są wspomagane przez menu i pytania wyświetlane na monitorze. Pakiet został zaimplementowany na komputerze PC AT w systemie operacyjnym MS DOS 4.0 lub późniejszym).

Zmiany scenariusza i funkcji określających reguły decyzyjne, wymagające ponownej kompilacji programu symulacyjnego, nie są kłopotliwe dzięki zastosowaniu języka *Turbo Pascal v.6.0 (5.5)* i wbudowanie tej czynności do pakietu zintegrowanego. Struktura pakietu umożliwia elastyczne wykorzystanie dyskowych zbiorów danych i wyników, ułatwia przekazywanie między programami informacji o wspólnych parametrach i przy odpowiednim ich zorganizowaniu znacznie przyspiesza wszystkie czynności przygotowawcze symulacji i edycję oraz opracowywanie wyników. Na schemacie przedstawiono strukturę pakietu (Rys.6.1).



Rys.6.1 Schemat struktury pakietu symulacyjnego *ECOSYM*

W prostokątnych ramkach przedstawiono programy, a w owalnych zbiory danych. Dla uproszczenia, na schemacie każdy typ zbioru danych ma tylko jednego reprezentanta - w praktyce może być ich wiele z różnymi nazwami. Zbiory PLIKI.DAT i CONFIG.SYM zawierają listy aktywnych nazw i ścieżek dostępu dla poszczególnych rodzajów zbiorów danych. Specyfikacja ta może być dowolnie zmieniana zarówno poza pakietem, jak i w czasie jego działania. Zbiory ENGLISH.MSG i POLISH.MSG są stałymi zbiorami tekstowymi zawierającymi wzorce komunikatów pakietu dla operatora w języku angielskim i polskim. Ich wydzielenie umożliwia zmianę wersji językowej pakietu bez potrzeby kompilacji programów źródłowych. Poszczególne programy pakietu uruchamiane indywidualnie zapewniają wybór polskiej wersji językowej wymagają wywołania nazwy programu z parametrem 'p').

Program *ECOTEST* jest programem zarządzającym pakietem. Pozostałe programy uruchamiane są pod jego kontrolą, bądź niezależnie (jeśli rezygnujemy z wbudowanego edytora zbiorów PLIKI.DAT i CONFIG.SYS oraz ze wspomaganie kompilacji programu symulacyjnego przy zmianach modeli matematycznych lub scenariusza symulacji). W obu przypadkach wymiana informacji między programami pakietu odbywa się poprzez pliki dyskowe.

6.4. Dane sieci wodnej

Dane dotyczące sieci wodnej są zawarte w dwóch zbiorach dyskowych:

- dane węzłów (WEZLY.WEZ),
- dane gałęzi (GALEZIE.GAL).

Jako węzły reprezentowane są następujące elementy systemu wodnego:

- zbiorniki,
- punkty spływu (łączenia) dwóch lub więcej strumieni,
- punkty rozplywu (dystrybucji) strumienia na dwa lub więcej strumieni,
- konsumenci wody.

Gałęzie sieci reprezentują takie elementy systemu, jak:

- naturalne dopływy zewnętrzne (rzeki i skupione modele spływu powierzchniowego),
- przepływy między węzłami (w rzekach, kanałach),
- przepływy z ujęć wody do odbiorców,
- zrzuty odbiorców wody,
- odpływy z systemu,
- przerzuty wody za pomocą rurociągów lub innych urządzeń technicznych,
- niektóre wyróżnione przepływy, fizycznie transportowane przez wyżej wymienione gałęzie, lecz wydzielone przez szczególny sposób użytkowania (np. priorytet), powodujące równocześnie potrzebę wprowadzenia sztucznych węzłów.

Przyjęto, że dane liczbowe określające zmienne wejściowe podane są w następujących jednostkach fizycznych:

- dopływy, pobory - m^3/s
- opad - mm/miesiąc
- długość okresu - miesiące.
- objętości - [mln m^3]
- poziom wody - [m].

Dla zanieczyszczeń, ze względu na ich różnorodną naturę fizyczną, jednostki będą zależały od konkretnego problemu.

6.5. Ciągi zmiennych egzogenicznych

Struktura rekordów ciągu wejściowego

Zakłada się, że ciąg czasowy zmiennych wejściowych (niezależnych) do symulacji jest przygotowywany przed rozpoczęciem symulacji w postaci zbioru dyskowego (CIAGWE.DAT). Pozwala to prowadzić wielokrotne eksperymenty symulacyjne na tych samych ciągach czasowych w celu porównania różnych reguł sterowania, różnych poziomów poboru wody lub różnych stanów początkowych zbiorników. Ciąg taki może zawierać do 10-ciu zmiennych niezależnych, których wartości są określone dla 2 do 36 okresów roku w horyzoncie do 100 lat. Zmienne ciągu mogą reprezentować dowolne zmienne egzogeniczne modelowanego systemu: dopływy zewnętrzne, pobory użytkowników, stężenia zanieczyszczeń w dopływach (zrzutach użytkowników).

Struktura rekordów pliku danych wejściowych umożliwia zapis informacji dla zmiennej długości okresów roku. Oprócz wartości bieżących podane są wartości średnie (oczekiwane) poszczególnych zmiennych dla każdego okresu roku. Każdy rekord zawiera także informację opisującą jego położenie na osi czasowej (numer roku i numer okresu).

Metody generacji ciągów

Dane ciągu wejściowego CIAGWE.DAT mogą być generowane kilkoma sposobami:

1) wprowadzenie kopii zbioru historycznego, zarejestrowanego dowolną metodą w postaci pliku tekstowego (ASCII), zawierającego dane pojedynczej zmiennej pogrupowane w 52-elementowe grupy wartości tygodniowych typu *real*, poprzedzane numerem roku (*word*). Odpowiednia procedura pozwala przy tym dokonać transformacji danych na dowolną liczbę okresów w roku ≤ 52 (przy założeniu, że wszystkie okresy są jednakowe).

2) kopiowanie ciągu dla wybranej zmiennej z innego zbioru tego samego typu. Tak, jak wyżej, możliwe jest kopiowanie ze zbioru o większej liczbie

okresów w roku do zbioru o mniejszej ich liczbie. Program zapewnia automatyczną transformację (z zastosowaniem interpolacji odcinkowo liniowej.

3) generowanie ciągu zmiennych pseudolosowych o rozkładzie odcinkowo-liniowym określonym w zbiorze DYSTR.DAT (niezależne rozkłady dla każdego okresu roku).

4) ręczne wpisywanie kolejnych wartości wybranej zmiennej dla całego horyzontu czasowego lub ręczna zmiana niektórych wybranych wartości w uprzednio dowolnie zbudowanym ciągu. Wykorzystano tu prosty edytor tablic, umożliwiający szybki przegląd ciągu i ewentualne korekty wybranych wartości.

6.6. Scenariusz symulacji i jego zmiany

Program symulacyjny *ECOSYM* budowany jest jako program w języku *Turbo -Pascal* przy maksymalnym wykorzystaniu biblioteki *ECOSWM.TPU*, specjalnie zdefiniowanych procedur, co daje w efekcie prosty język symulacyjny. Elementami tego języka są instrukcje w *Turbo-Pascalu* oraz sekwencje wywołań procedur, których zadania oraz reguły kolejności występowania są specjalnie określone.

Głównym elementem (procedurą), który został zdefiniowany, jest procedura *SolveStage*, której wywołanie powoduje:

a) odczytanie z rekordu danych ciągu wejściowego danych dotyczących jednego etapu roku,

b) ewentualne wprowadzenie przez operatora zmian parametrów danego etapu

b) wykonanie obliczeń dla wszystkich węzłów i gałęzi sieci w zadanej kolejności (obliczane są przepływy etapowe i stany zbiorników na końcu etapu przy zadanych stanach początkowych oraz poziom zanieczyszczeń w zbiornikach na końcu etapu oraz zanieczyszczeń w strumieniach na początkach i na końcach gałęzi).

Ze względu na przeznaczenie programu symulacyjnego do badań porównawczych, szczególną uwagę poświęcono możliwościom wariantowania danych. Do wprowadzania danych i ich zmian mogą być wykorzystywane trzy różne mechanizmy:

- procedury czytające zbiory dyskowe z przygotowanymi zestawami danych, (w tym danych o nazwach zbiorów źródłowych i docelowych),
- procedury pozwalające wprowadzić grupy danych w postaci parametrów w tekście źródłowym segmentu głównego programu,
- procedury konwersacyjne umożliwiające interwencje operatora w wybranych momentach w trakcie działania programu.

W zależności od częstości z jaką można zmieniać wartości danych, dzielą się one na dwie grupy:

- dane, które mogą być zmieniane w każdym kroku symulacji:
 - a) kolejność liczenia węzłów,
 - b) numery reguł decyzyjnych,
 - c) wartości ograniczeń.
- dane, ustalane jednokrotnie dla całego ciągu symulowanego:
 - a) numer roku początkowego,
 - b) numer etapu początkowego,
 - c) numer roku końcowego,
 - d) numer etapu końcowego,
 - e) nazwy zbiorów danych (struktura sieci, dane historyczne)

6.7. Funkcje przepływu, algorytmy sterowania i modele zanieczyszczeń

Ponieważ głównym celem badań symulacyjnych jest badanie efektów stosowania określonych algorytmów sterowania systemem wodnym, zbiory procedur określających przepływy gałęzi zostały wydzielone w formie plików *pascalowskich* dołączanych przy kompilacji programu ECOSYM.PAS. Zbiory te (ECOFUNG.DAT i ECOREG.DAT) zawierają listy procedur opisujących zależności przepływu od wielkości mierzonych (zmiennych systemu wodnego) i parametrów dobieranych (np. optymalizowanych). W ten sam sposób dołączane są zbiory procedur modelowania procesów transformacji zanieczyszczeń i rozdziału wypływu ze zbiornika na kilka strumieni - ECOPOLL.DAT i ECOBIL.DAT. Jeśli chcemy wprowadzić nowe zależności do listy procedur, ponowna kompilacja programu ECOSYM jest niezbędna, natomiast, jeśli zmiany algorytmów polegają na zmianach przypisania poszczególnych procedur do poszczególnych gałęzi lub węzłów w ramach istniejącej listy - kompilacja nie jest potrzebna: wystarczy w zbiorze danych gałęzi (węzłów) zmienić numer identyfikujący odpowiednią procedurę. Zmiana taka jest możliwa w pełnym zakresie przez edycję danych sieci, natomiast w trakcie symulacji możliwa jest doraźna zmiana funkcji przepływu i algorytmów sterowania pojedynczych gałęzi w bieżącym okresie.

Dla użytkownika, który jest zainteresowany możliwościami ingerowania w wewnętrzną strukturę modeli elementów sieci istotna jest lista parametrów i zmiennych służących do wymiany informacji między tymi modelami i programem symulacyjnym. Zbiór zmiennych programowych, do których wartości mają dostęp procedury algorytmów sterowania (a także funkcje określające przepływy w gałęziach nie sterowanych i modele zanieczyszczeń)

jest określony przez definicje w modułach *EcoDef* i *EcoReg* (cytowane częściowo w Dodatku A.2).

6.8. Przebieg eksperymentu symulacyjnego

Przebieg pracy programu symulacyjnego w istotny sposób zależy od scenariusza określonego przez segment główny programu. Nie tylko sam proces symulacji, ale także sposób komunikowania operatorowi wyników i wprowadzanie danych są określone przez ciąg instrukcji użytych w tym segmencie. Ponadto w czasie obliczeń symulacyjnych możliwe jest przełączanie przełącznika AUTO/MANUAL. W pozycji MANUAL na początku każdego etapu możliwa jest zmiana wartości prognoz wykorzystywanych w regułach decyzyjnych oraz parametrów tych reguł (łącznie ze zmianą numeru reguły). Wykorzystując możliwości programu można tworzyć następujące scenariusze symulacji:

- 1) dla określonego horyzontu (dany rok i okres startowy oraz rok i okres końcowy) symulacja przebiega bez ingerencji operatora zgodnie z zadaniem ciągiem danych wejściowych i okresowo zmiennymi parametrami ustalonymi w danych węzłów i gałęzi; reguły sterowania i procedury modeli elementów sieci są stałe,
- 2) dla danych jak wyżej kolejne kroki symulacji (etapy) są wykonywane na żądanie operatora po ewentualnym wprowadzeniu prognozowanych przepływów, modyfikacji numerów funkcji gałęzi sterowanych i parametrów liczbowych w tych funkcjach - modyfikacje te dotyczą tylko bieżącego etapu i w następnym są zapominane,
- 3) po wykonaniu obliczeń dla określonej liczby kroków (np. po roku) proces symulacji restartuje z ustalonych warunków początkowych; powtarzanie tej operacji wielokrotnie (50 - 500 razy) dla ciągu niezależnych realizacji rocznych danych wejściowych pozwala oceniać stochastyczne własności systemu w funkcji stanu początkowego,
- 4) obliczenia jak w punkcie 1) wykonane dla ciągu wejściowego, którego wybrane składniki zostały wprowadzone jako zdeterminowane funkcje czasu, reprezentujące np. scenariusz rozwoju potrzeb użytkownika, rozbudowy urządzeń przesyłu wody itp.; statystyczna ocena takiego procesu wymaga powtarzania go wielokrotnie dla tych samych funkcji deterministycznych i różnych realizacji ciągów zmiennych losowych,
- 5) w trakcie realizacji kolejnych kroków wg scenariusza 2) ręcznie zmieniane parametry są zapamiętywane w ciągu wyników symulacji; po skopiowaniu ich do ciągu wejściowego możemy następnie wielokrotnie powtarzać ręcznie wygenerowany scenariusz - na przykład okresowo zmienne reguły sterowania,

- 6) włączenie do segmentu głównego programu symulacyjnego iteracyjnej procedury optymalizacyjnej i wielokrotna realizacja jednego z poprzednich wariantów 1), 3) lub 4) z równoczesnym obliczaniem optymalizowanego wskaźnika jakości; jeśli wprowadzona procedura zostanie wyposażona w narzędzia dostępu do dyskowych plików danych sieci wodnej, argumentami optymalizacji mogą być dowolne parametry funkcji sterowania systemem - w ogólnym przypadku nie da się jednak określić a priori warunków jednoznaczności rozwiązania ani zbieżności procedury.

8. WNIOSKI

8.1. Ogólne problemy modelowania matematycznego systemów wodnych

Problem sterowania w systemach wodnych rozwiązywany jest w oparciu o definicje modeli trzech głównych jego elementów:

- a) model systemu wodnego,
- b) opis matematyczny zadań i kryteriów oceny ich realizacji,
- c) model algorytmu sterowania.

W pierwszej grupie zagadnień mamy do dyspozycji różnorodne modele hydrologiczne, modele sieciowe, modele dynamiczne określające własności systemu w różnych skalach czasu i rozległości przestrzennej. W zasadzie jedynie modele sieciowe, dzięki radykalnemu uproszczeniu charakterystyk obiektu, mogą stanowić uniwersalne narzędzie opisu różnych systemów wodnych. W przypadku pozostałych modeli istotnego znaczenia nabierają indywidualne cechy ilościowe elementów systemu, a często są one budowane dla potrzeb tylko jednego, konkretnego obiektu.

Z modelowaniem systemu wodnego ściśle związane są modele zmiennych egzogenicznych (szczególnie dopływów wody), których znaczna część ma charakter losowy. Analiza modeli opadów jako procesów losowych i dynamiki spływu powierzchniowego należy do najtrudniejszych zadań - główną przeszkodą jest złożoność dokładnych modeli i niedostatek danych pomiarowych z systemu rzeczywistego do ich identyfikacji. W tej sytuacji korzysta się z danych historycznych służących jako przykłady realizacji procesu stochastycznego, bądź buduje się uproszczone generatory takich procesów, modelujące niektóre, wybrane cechy procesów rzeczywistych.

Określenie zadań i kryteriów oceny ich realizacji należy w zasadzie do rzeczywistych dysponentów i użytkowników systemu wodnego. Należy zwrócić uwagę na fakt, że coraz częściej na liście zadań systemu takich, jak: zaopatrzenie miast, zasilanie przemysłu, nawodnienia rolnicze, żegluga, itp., pojawia się zadanie: utrzymać stan systemu wodnego w możliwie nie zmienionej postaci jako system ekologiczny. Narzędziami analizy współzależności różnych zadań i ich wskaźników są metody wielokryterialne, systemy eksperckie i ogólnie systemy wspomagania decyzji (decision suport systems). Niezależnie od listy zadań, ocena ich realizacji w systemie wodnym ma charakter dualny:

- z jednej strony ocenia się system jako źródło zaopatrzenia w wodę, tj. jego wydajność, niezawodność dostawy, częstość i głębokość deficytów,

- z drugiej strony niezbędne są kryteria oceniające obciążenie systemu przez użytkowników, obniżenie parametrów ilościowych i jakościowych przez nich spowodowane.

W ten sposób można określić wzajemną odpowiedzialność gospodarza systemu i użytkowników.

Liczność i niewspółmierność kryteriów oceny staje się szczególnie kłopotliwa wówczas, gdy oprócz oceny ilości wody, oceniamy jej parametry jakościowe (zanieczyszczenia). Wynika stąd konieczność stosowania wskaźników zagregowanych, w których bezpośrednio oceniane parametry wody są poddane transformacji mającej na celu zarówno redukcję ich liczby, jak wprowadzenie wspólnej miary.

Modele sterowania można formułować w zasadzie w oderwaniu od konkretnych liczbowych charakterystyk systemu. Biorąc pod uwagę fakt, że poza bardzo prostymi przypadkami, nie jest możliwa matematyczna synteza układu sterowania, tylko od inwencji projektanta zależy postać modelu sterowania. Najczęściej stosowane są dwa podejścia: a) konstruuje się reguły sterowania oparte na przesłankach intuicyjnych i doświadczalnych, o złożonej wielowarunkowej strukturze, wynikającej z analizy pewnych typowych sytuacji w jakich należy podejmować decyzje, b) reguły sterowania mają prostą matematycznie postać liniową tak, aby możliwe było określenie charakterystyk układu zamkniętego 'system-reguła', a następnie określenie warunków optymalności dla parametrów reguł.

W przypadku reguł sterowania dla pojedynczego zbiornika praktycznie użyteczna informacja dotyczy: aktualnego stanu zbiornika, dopływów zbiornika przeszłych i prognozowanych oraz potrzeb użytkowników korzystających z ujęcia na wypływie.

Zastosowanie takich lokalnych reguł do sterowania w systemach wielozbiornikowych nie napotyka wprawdzie na przeszkody formalne (jeśli w regułach tych występują parametry, których dobór umożliwia spełnienie ograniczeń globalnych), jednakże ich skuteczność, nawet po optymalizacji, jest często niższa, niż prostych reguł heurystycznych, korzystających z informacji bieżącej o całym systemie. Dla kaskady zbiorników zaproponowano (p.5.5) regułę sterowania łączącą możliwość bezpośredniej optymalizacji z globalnym zasięgiem informacji bieżącej (stany wszystkich zbiorników poniżej zbiornika sterowanego).

Omawiając użyteczność informacji bieżącej w regułach decyzyjnych zwrócono uwagę na dość luźny związek pomiędzy ilością tej informacji a efektywnością zadania optymalizacji ocenianą z punktu widzenia określonych kryteriów. Niespójność informacji użytej w mechanizmie sterowania i wykorzystanej przy formułowaniu ograniczeń i kryteriów optymalizacji parametrów tego mechanizmu może być powodem, że zwiększenie ilości

informacji bieżącej w mechanizmie sterowania pogarsza jego efektywność względem określonych kryteriów. Na przykład zastąpienie w liniowej regule decyzyjnej wartości oczekiwanej dopływu, wartością rzeczywistą, może spowodować wyraźne pogorszenie wskaźników związanych z równomiernością zaopatrzenia użytkowników w wodę.

Badanie licznych przykładów wykazuje, że analityczne, liniowe reguły sterowania (LRD) mogą być użyteczne w zasadzie tylko pośrednio: bądź do oceny wymaganych pojemności zbiorników, bądź do określenia dopuszczalnych obszarów trajektorii stanu zbiorników. Reguły pochodne, z modyfikacjami mającymi na celu poprawę skuteczności lub urealnienie ze względu na ograniczenia, tracą podstawową zaletę - analityczność. W celu zachowania zalety reguł liniowych niezbędne jest jeszcze jedno uproszczenie: model systemu musi być również liniowy, a zmienne losowe winny mieć znane i niezależne rozkłady.

Dokonany przegląd typów reguł decyzyjnych sterowania zbiornikami nie wyczerpuje wszystkich możliwości, zwłaszcza w grupie reguł nieliniowych.

Jak pokazano na przykładzie, możliwe jest połączenie zalet praktycznej użyteczności reguł doświadczalnych z analityczną drogą optymalizacji reguł liniowych poprzez stworzenie reguł heurystycznych, których obszary działania wyznaczają rozwiązania optymalne reguł liniowych. Brak możliwości bezpośredniej optymalizacji takich reguł i agregacji charakterystyk systemu powodują, że ich analiza sprowadza się do analizy przypadków szczególnych, niemal wyłącznie metodami symulacyjnymi.

W zasadzie, każdy z powyższych modeli składających się na model sterowania systemu wodnego wymaga na pewnym etapie badania, zastosowania jedynej skutecznej w takiej sytuacji techniki modelowania, techniki symulacyjnej. Badania symulacyjne mogą służyć zarówno do testowania poprawności uproszczonych modeli analitycznych wykorzystywanych do bezpośrednich obliczeń optymalizacyjnych, sprawdzania poprawności wyników optymalizacji w sensie statystycznym, analizy scenariuszy rozwoju systemu, a także bezpośredniej optymalizacji na drodze wielokrotnej symulacji wariantów sterowania.

Warunkiem powodzenia eksperymentów symulacyjnych jest łatwość generowania modeli, modyfikacji ich parametrów, dostępność wyników symulacji do analizy w różnym kontekście - stąd potrzeba wygodnych w użyciu komputerowych programów symulacyjnych. Cechy te posiada, specjalnie w tym celu opracowany, pakiet symulacyjny *ECOSYM*. Umożliwia on budowę modeli symulacyjnych uwzględniających nie tylko ilość wody w systemie ale także zanieczyszczenia w poszczególnych elementach sieci i transformację tych zanieczyszczeń. Pozwala włączyć do modelu systemu model jego sterowania i liczyć wartości wybranych wskaźników. Dzięki temu możliwa jest ocena

wpływu sterowania ilością wody za pomocą klasycznych reguł decyzyjnych na parametry jakościowe, a także poszukiwanie reguł mających jako zadanie sterowanie poziomem zanieczyszczeń.

8.2. Wnioski szczegółowe z analizy przykładów

Modele sterowania ilością wody

1. Programy optymalizacyjne, mimo wielu uproszczeń i przybliżeń pozwalają otrzymać poprawne reguły z punktu widzenia, żądanej w zadaniu, niezawodności systemu wodnego. Natomiast oceniając ich niską skuteczność w zapewnianiu dostatecznie dużej ilości wody należy pamiętać, że postać reguły jest wybrana arbitralnie, tak, aby stabilizować działanie systemu. Ponadto główny sens reguły liniowej polega na dopasowaniu trajektorii planowanych zapełnień zbiorników do sezonowych wahań wartości oczekiwanej dopływów. W rozpatrywanym przykładzie regionu Górnej Wisły czynnik sezonowy jest co prawda wyraźny, jednakże wahania przypadkowe mają większe znaczenie. W tej sytuacji planowana ilość wody dostarczanej użytkownikom mniej zależy od trajektorii zapełnień zbiornika niż od poziomu gwarancji użytkownika.

2. Gdy system wodny ma inne, oprócz gwarancji stanów, cele do spełnienia (np. maksymalizację ilości dysponowanej wody), reguły (5.9) czy (5.11) mogą okazać się niekorzystne. Z tego powodu zadanie optymalizacji rozrządu należy uznawać za narzędzie pomocnicze do wyznaczania orientacyjnego profilu retencji. Planowane stany zbiorników pozwalają właściwie wykorzystać ich retencję do gromadzenia zasobów w okresach przewidywanych nadmiarów wody w stosunku do potrzeb. Taki wyjściowy profil może być bezpośrednio przydatny do syntezy innej reguły, może też wyrabiać intuicję w poszukiwaniu lepszych rozwiązań. Zachęcające wyniki dla reguły, która łączy informacje o granicznych planowych stanach zbiorników ze zdroworozsądkową zasadą oszczędzania wody, pozwalają przypuszczać, że wyniki optymalizacji reguł liniowych mogą być wykorzystywane do doboru parametrów reguł standardowych i pochodnych. Mimo, że bezpośrednio zastosowana reguła liniowa tylko nieznacznie poprawia skuteczność sterowania w stosunku do działania operatora, to wykorzystanie jej parametrów optymalnych w prostej regule heurystycznej daje efekt pozytywny znacznie wyraźniejszy.

3. W systemach wielozbiornikowych nawet długie doświadczenie w rozrządzie wody nie wyrabia w operatorze intuicji, która mogłaby zastąpić obliczenia optymalizacyjne pożądaných stanów zbiorników. Przykładowo symulowany algorytm naśladujący rzeczywistą gospodarkę zasobami wodnymi jest gorszy pod każdym względem od heurystycznych reguł wykorzystujących

wyniki optymalizacji, mimo że użytkownicy mają priorytet, i mimo wykorzystywania informacji o poziomach sąsiednich zbiorników.

Wnioski z badań symulacyjnych transformacji zanieczyszczeń

Dla sterowania stężeniem zanieczyszczeń systemie wodnym największe znaczenie ma ilość, miejsca i chwile zrzutu zanieczyszczeń.

Wpływ stabilizacji stanu zbiorników zaznacza się pozytywnie jedynie wówczas, gdy prowadzi ona do utrzymania wysokiego stanu zbiornika w chwili dużych zrzutów zanieczyszczeń.

Wstępne eksperymenty, dotyczące wpływu sterowania wypełnieniem zbiornika na stężenie zanieczyszczeń wskazują na małe znaczenie szybkich zmian stanu zbiornika na średnie stężenie zanieczyszczeń nierozkładalnych. W związku z tym dalsze badania dotyczą tych aspektów reguł sterowania zbiornikami, które wpływają na sezonowe średnie wypełnienia zbiorników a mniej dotyczą wyrównywania wahań chwilowych.

Dla bardzo dużych zbiorników założenie pełnego mieszania jest naogół zbyt prostym uproszczeniem i w przeciwieństwie do sterowania ilością wody, proporcje pojemności kolejnych zbiorników kaskady i ich ilość mają istotne znaczenie w transformacji zanieczyszczeń.

Tym nie mniej z punktu widzenia transformacji zanieczyszczeń (rozkładu) efekt mieszania w zbiorniku powoduje, że niższe stężenia zanieczyszczenia wyjściu otrzymujemy dla kaskady małych zbiorników niż dla jednego zbiornika o równoważnej pojemności.

Ogólnie, wyniki symulacji dotyczące zanieczyszczeń są wrażliwe na wybór modeli transformacji zanieczyszczeń w elementach systemu. Oznacza to, że rezultaty ilościowe w istotny sposób zależą od konkretnego obiektu, jego lokalnych warunków hydrologicznych, typów lokalnie występujących zanieczyszczeń i związanych z potrzebami użytkowników wody ich dopuszczalnych poziomów.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Agababian K.A., W.M. Sznajdman: Wybor parametrov wodochraniliszcz irrigacionnogo naznachenija s ispolzowanijem wzajmoswiazannyh optimizacjonnyh i imitacionnyh modelej. *Wodnyje Resursy*, No 2, pp. 168-177, Moskwa, 1990.
- [2] Agasandian G.A.: Algoritmy postrojenija dispetczrskich prawil uprawlenija dla kaskadow wodochraniliszcz. *Wodnyje Resursy*, No 5, pp. 34-46, 1985.
- [3] Agasandian G.A.: Opisanije prawil uprawlenija kaskadami wodochraniliszcz. Soobsczenija po prikladnoj matematikie. Wyzisliitelnyj Centr AN SSSR, Moskwa 1987.
- [4] Analiza algorytmów rozdziału wody oraz agregacja stochastycznych ograniczeń na przepływy. Raport IBS PAN, Warszawa, 1982.
- [5] Anis A.A., E.H.Lloyd, S.D.Saleem: The Linear Reservoir with Markovian Inflows. *Water Resources Research*, vol. 15, no 6, pp 1623-1627, dec. 1979.
- [6] Antunes M.P., M.J. Seixas, A.S. Cámara, M. Pinheiro: A New Method of Qualitative Simulation of Water Resources Systems, 2: Applications, *Water Resources Research*, vol. 23, no 11, pp 2019-2022, 1987.
- [7] Askew A.J.: Optimum Reservoir Operating Policies and the Imposition of Reliability Constraints. *Water Resources Resarch*, vol. 10, no 1, pp 51-56, 1974.
- [8] Aubin J.-P.: Dynamical Qualitative Simulation. IIASA Working Paper, WP-92-61, Sept. 1992.
- [9] Babarowski J., J. Gutenbaum, H. Pietkiewicz-Saldan: Multilevel Algorithm for Water Management in Agricultural System. Prep. of IFAC Conf. on Large Scale Systems - Theory and Applications, 26-29 August 1986. Edited by H.P. Geering, M. Mansour, Pergamon Press, 1986.
- [10] Beck M.B., P.C. Young: A dynamic model for DO-BOD relationship in non-tidal streams. *Water Resources Research*, vol. 11, no 9, pp 769-776, 1975.
- [11] Behrendt H.: Point and Diffuse Loads of Selected Pollutants in the River Rhine and its Main Tributaries. Research Reports IIASA, RR-93-1, Feb. 1993.
- [12] Collins A.G., R.L. Johnson: Finite Element Method for Water Distribution networks. *Journal AWWA*, July 1975.
- [13] Coulbeck B., M. Brdyś, ... : An hierarchical approach to optimized control of water distribution systems. IFAC on Large Scale Systems Theory and Applications, vol.I, pp. 422-427, Aug. 1986.

- [14] Czerniajew A.M., I.M. Sziriak, A.M. Asonow, A.D. Rikun, A.S. Triegub: Rasczot optimalnogo plana razwitija WChS promyslennogo uzła. *Wodnyje Resursy*, No 3, pp. 142-154, Moskwa 1990.
- [15] Das P., Y.Y. Haimes: Multiobjective Optimization i Water Quality and Land Management. *Water Resources Research*, vol. 15, no 6, pp 1313-1322, 1979.
- [16] Diabi A., H. Ramoul: Réalisation d'un modele de simulation pour un aménagement des eaux (Sur le bassin versant de l'Oued Seybouse). Projèt de diplôme d'ing. inform. Institut d'Informatique, Université d'Annaba, Algérie, 1986.
- [17] Eisel L.M.: Chance-Constrained Reservoir Model. *Water Resources Research*, vol.8, no 2, pp 339-347, 1972.
- [18] Fedra K.: Simulation Modeling in Enviromental Impact Assessment. Paper presented at The International Conf. on Environmental Impact Analysis for Developing Countries, New Delhi, India, 28 Nov. - 2 Dec. 1988.
- [19] Florczak H.: Studia i badania nad lokalizacją automatycznych stacji pomiaru jakości wód. Materiały Bad. IGW, seria: Ochrona Wód przed Zanieczyszczeniem, nr 6, IGW, Warszawa, 1971.
- [20] Gangolfi C., K.A. Salewicz: Multiobjective Operation of Zambezi River Reservoirs. IIASA Working Paper, WP-90-31, July 1990.
- [21] Gundelach J., C.S.ReVelle: Linear decision rule in reservoir management and design - 3. A rule that minimizes output variance. *Water Resources Research*, vol. 11 , No. 2, pp. 190-196, 1975
- [22] Gutenbaum J.: Modelowanie matematyczne systemów. Omnitech Press, Warszawa 1993.
- [23] Gutenbaum J., M. Inkielman, D. Piątkowska-Wieczorek, H. Pietkiewicz-Sałdan: Operative Distribution of Water Resources for Agriculture Purposes. An Attempt to Obtaining a Numerical Solution. Proc. of Joint Task Force Meeting on Development Planning for the Notec and Silistra Regions. CP-80-9, vol. II, p. 296-319. Laxenburg, May, 1980.
- [24] Gutenbaum J., M. Inkielman, H. Pietkiewicz-Sałdan: Operative control of a water system with randomly varied form of the objective function. Proc. V-th Polish-Italian symposium on Applications of systems theory to economics, management, and technology, pp. 295-309, Torun 1981.
- [25] Gutenbaum J., M. Inkielman, H. Pietkiewicz-Sałdan: Some Quality and Quantity Problems in Water Networks. *Syst. Analys. Model. Simul.*, no 6, pp 409-420, Akademie-Verlag, Berlin 1989.
- [26] Gutenbaum J., M. Inkielman, H. Pietkiewicz-Sałdan: Heurystyczne reguły decyzyjne do sterowania wielozbiornikowymi systemami wodnymi. *Monografie KGW PAN*, zesz.7, pp 115-132, Warszawa 1995.

- [27] Gutenbaum J., M.Inkielman, H. Pietkiewicz-Sałdan: Linear Decision Rules: Models and Reality. *Syst. Analys. Model. Simul.*, no 8, pp 407-420, Akademie-Verlag, Berlin 1991.
- [28] Hashimoto T., J.R. Stedinger, D.P. Loucks: Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20, 1982.
- [29] Houck M.R.: A chance-constrained optimization model for reservoir design and operation. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1011-1016, 1979.
- [30] Houck M.R., B.Datta: Performance evaluation of a stochastic optimization model for reservoir design and management with explicit reliability criteria. *Water Resources Research*, Vol.17, No. 1, pp.827-832,1981.
- [31] Hullet W.: Optimal Estuary Aeration: An Application of Distributed parameter Control Theory. Proc. of 5-th IFIP Conf. on Optimiz. Techn. Part II, pp 222-230. Berlin 1973.
- [32] Inkielman M.: Syntetyczny wskaźnik obciążenia zasobów wodnych przez działalność wydzielonego obszaru ekonomicznego (gminy). Oprac. IBS PAN, Warszawa 1992.
- [33] Inkielman M.: Symulacja pracy kaskady zbiorników wodnych w horyzoncie wieloletnim z uwzględnieniem transformacji niektórych typów zanieczyszczeń. Oprac. IBS PAN, Warszawa 1992.
- [34] Inkielman M.: Komputerowy pakiet symulacji systemów wodnych. Opracowanie ZTS IBS PAN (temat A1110), Warszawa 1991.
- [35] Inkielman M.: Analiza i symulacyjne badania liniowych reguł decyzyjnych do sterowania rozrządem wody w systemach wielozbiornikowych. Prace IBS PAN, seria: Badania Systemowe, t. 15, PWN Warszawa-Łódź 1991.
- [36] Inkielman M., H. Pietkiewicz-Sałdan: Korekty i rozbudowa programu symulacyjnego ... Opracowanie ZTS IBS PAN w ramach CPBP 03.09/7.06. Warszawa, 1987.
- [37] Inkielman M., H. Pietkiewicz-Sałdan: Testowanie niezawodności pakietu programów symulacji sieci wodnej ze zbiornikami Opracowanie IBS PAN w ramach CPBP 03.09/7.06. Warszawa, 1988.
- [38] Joeres Erhard F., G.J. Sens, H.M. Engelmann: The Linear Decision Rule (LDR) Reservoir Problem with Correlated Inflows. 1.Model Development. *Water Resources Research*, vol. 17, no 1, pp 18-24, feb. 1981.
- [39] Kaczmarek Z.: Storage Systems Dependent on Multivariate Stochastic Processes. Research Report IIASA, Laxenburg, Austria, July 1975.
- [40] Kaczmarek Z.: Kryteria strowania systemami wodno-gospodarczymi. Mat. Konf. nt. Współczesna gospodarka wodna i hydrologia. Politechnika Warszawska, 1983.

- [41] Kindler J., D.P. Loucks: Water Resources Research at IIASA: 1973-1988, IIASA Working Paper, WP-88-123, 1988.
- [42] Klemeš V.: Watershed as Semi-Infinite Storage Reservoir. *J. Irrig. Drain. Div. Amer. Soc. Civil Eng.*, vol. 99, pp 477-491, 1973.
- [43] Koczarian A.G., I.L. Chranowicz: Potokowaja model obosnowanija parametrov elementow i wodoochrannych mieroprijatij wodochozjajstwiennoj sistiemy. *Wodnyje Resursy*, No 6, Moskwa 1989.
- [44] Koivusalo H., O. Varis, L. Somlyódy: Water Quality of Nitra River, Slovakia - Analysis of Organic Material Pollution. IIASA Working Paper, WP-92-084, Nov. 1992.
- [45] Krawczak M., K. Mizukami: River pollution control as a conflict. W opracowaniu zbior.: *Constructive Aspects of Optimization*, red. K. Malanowski, K. Mizukami. Prace IBS PAN, seria: *Badania Systemowe*, tom 6, PWN, Warszawa-Łódź 1985.
- [46] Kwaśniewicz Z.: Opis techniczny i zasada działania automatycznych stacji pomiaru jakości wody w Polsce. *Materiały Bad. IGW*, seria: *Ochrona Wód przed Zanieczyszczeniem*, nr 8, IGW, Warszawa, 1972.
- [47] La Loggia G., M.R. Mazolla: Synthetic performance indices in real decision process. *Proc. of the Baltimore Symposium: Closing the Gap Between Theory and Practice*, May 1989. IAHS Publ., no. 180, 1989, pp 175-185.
- [48] Lam D.C.L., A.S. Fraser, A.G. Bobba: Simulation and Analysis of Watershed Acidification. In M.B. Beck [ed.], *Systems Analysis in Water Quality Management, Advances in Water Pollution Control*, Pergamon Press Ltd., Oxford, UK, 1987.
- [49] Landwehr J.M.: A Statistical View of a Class of Water Quality Indices. *Water Resources Research*, vol. 15, no 2, pp 460-468, 1979.
- [50] Lane M.: Conditional chance-constrained model for reservoir operation. *Water Resources Research*, Vol. 9, No.4, 1973.
- [51] Lettenmaier D.P.: Dimensionality Problems in Water Quality Network Design. *Water Resources Research*, vol. 15, no 6, Dec. 1979.
- [52] Loaiciga H.A., M.A. Marino: Comment on "Evaluation of a reliability programming reservoir model" by J.B. Strycharczyk and J.R. Stedinger. *Water Resources Research*, vol. 23, no 9, 1987.
- [53] Lochert P., R.M. Phatarfod: On the Problem of Discretization in Dam Theory. *Water Resources Research*, vol. 15, no 6, pp 1593-1597, dec. 1979.
- [54] Loucks D.P.: Some comments on linear decision rules and chance constraints. *Water Resources Research*, Vol. 6, no.2, pp. 668-671, 1970.

- [55] Loucks D.P., P.J.Dorfman: An evaluation of some linear decision rules in chance-constrained models for reservoir planning and operation. *Water Resources Research*, Vol. 11 no 6, pp. 777-782, 1975.
- [56] Loucks D.P., K. Fedra: Impact of Changing Computer Technology on Hydrologic and Water Resource Modeling. *Review of Geophysics*, vol. 25, no 2, 1987.
- [57] Loucks D.P., J. Kindler, K. Fedra: Interactive Water Resources Modeling and Model Use: An Overview. *Water Resources Research*, vol. 21, no 2, pp 95-102, 1985.
- [58] Lutra Sham S., S.R.Arora: Optimal Design of Single Reservoir System Using δ Release Policy. *Water Resources Research*, vol. 12, no 4, pp 606-612, dec. 1976.
- [59] Mienszikow I.S., O.R. Mienszikowa: Metody optymalnego uprawlenija i differencjalnych igr w zadaczach uprawlenija kaskadom wodochroniliszcz. Soobszczenija po prikladnoj matematikie. Wyzislitielnyj Centr AN SSSR, Moskwa 1983.
- [60] Nayak S.C., S.R.Arora: Optimal capacities for a multireservoir system using the linear decision rule. *Water Resources Research*, vol.7 no 3, pp 485-498, 1971.
- [61] Opracowanie zestawu modeli dla wspomagania podejmowania decyzji w procesie sterowania operacyjnego w systemie wodno-gospodarczym aglomeracji miejsko-przemysłowej. Opracowanie Instytutu Geofizyki PAN (w ramach PR 7.05.01.23), Warszawa, 1983.
- [62] Ostromecki J.: Podstawy melioracji nawadniających. Cz.IV.1: Ocena jakości wody do nawodnień, pp 280-290. PWN, Warszawa 1973.
- [63] Patten B.C. [ed.]: System Analysis and Simulation in Ecology. Vol. I, Academic Press, New York, 1971.
- [64] Peters R.J., Kai-Ching Chu, M.Jamshidi: Preliminary investigation into the optimal operation of a water resources system by stochastic programming. Prep.of the seventh Triennial World Congress of the IFAC. vol.2. Helsinki, Finland, 1978.
- [65] Pietkiewicz-Sałdan H.: Analysis and Physical Interpretation of Decision Rules of Operative Water System Management. Preprints of 9-th World Cogress of IFAC, Budapest, 1984.
- [66] Pietkiewicz-Sałdan H.: Sterowanie złożonymi systemami wodnymi z zastosowaniem reguł decyzyjnych. *Archiwum A i T*, t. XXXII, z.1-2, 1987.
- [67] Prijażinskaja W.G., A.D. Rikun, W.M. Sznajdman: Matematyczeskije modelirowanije w uprawlenii wodnymi resursami. Monografia red. W.G. Prijażinskaja, Nauka, Moskwa 1988.
- [68] Prijażinskaja W.G., W.M. Sznajdman: Metodologiczeskije aspekty ispolzowanija matematyczeskich modelej w zadaczach regionalnogo wodochozjajstwenного planirowanija. *Wodnyje Resursy*, No 3, pp. 167-175, Moskwa, 1989.
- [69] Raport końcowy - synteza (lata 1986 - 1990). C.P.B.P. 03.09: " Metody analizy i użytkowania zasobów wodnych". Koordynator: IG PAN . Warszawa, 1991.

- [70] Rebaïaia M.-L.: Modèle de simulation d'un réseau hydraulique superficiel (Region de Annaba). Thèse de magister en informatique de l'Université d'Annaba, 1985.
- [71] ReVelle Ch., E.Joeres, W.Kirby: The Linear Decision Rule in Reservoir Management and design. 1) Development of the Stochastic Model. *Water Resources Research*, vol. 5, no 4, pp 767-777, 1969.
- [72] ReVelle Ch., W.Kirby: Linear Decision Rule2) Performance Optimization. *Water Resources Research*, vol. 6, no 4, pp 1033-1044, 1970.
- [73] ReVelle Ch., J. Gundelach: Linear Decision Rule 4) A Rule that Minimizes Output Variance. *Water Resources Research*, vol. 11, no 2, pp 197-203, 1975.
- [74] ReVelle C.S., J.Gundelach: Linear decision rule in reservoir management and design - 5) A general algorith. *Water Resources Research*, Vol. 11, no. 2, pp. 204-207, 1975.
- [75] Rodhe F.G., K.Naparaxawong: Modified standard operation rules for reservoirs. *Journal of Hydrology*, 51, pp 169-177, 1981.
- [76] Rossman L.A.: Reliability-constrained Dynamic Programming and Randomized Release Rules in Reservoir Management. *Water Resources Research*, vol. 13, no 2, pp 247-255, 1977.
- [77] Schultz G.A., E. Plate: Influence of Chance Constraints on the Efficiency of a reservoir operated According to the Linear Decision Rule. Proc. 2-nd World Congress, Int. Water Resour. Assoc., dec. 1975.
- [78] Simonovich S.P.: Comment on "Evaluation of the reliability programming ..." by J.B.Strycharczyk and J.R.Stedinger. *Water Resources Research*, vol. 23, no 9, 1987.
- [79] Simons T.J., D.C.L. Lam: Some Limitations of Water Quality Models for Large Lakes: A Case Study of Lake Ontario. *Water Resources Research*, vol. 16, no 1, pp 105-116, 1980.
- [80] Shnaidman V.M.: Simulation Modelling of Water Resource Systems on the Basis of Aggregative Method. *Syst. Anal. Model. Simul.*, no 7, pp. 399-402, Academie-Verlag, Berlin, 1990.
- [81] Sniedovich M.: Reliability Constrained Reservoir Control Problems. 1) Metodological Issue. *Water Resources Research*, vol. 15, no 6, pp 1574-1582, dec. 1979.
- [82] Sniedovich M.: Analysis of a Chance-Constrained Reservoir Control Model. *Water Resources Res.* vol. 16, no 5, pp 849-853, oct. 1980.
- [83] Somolyódy L.: Water Quality Management in Urban Areas: The Challenge for Central and Eastern Europe. IIASA Working Paper, WP-92-053, Aug. 1992.
- [84] Somolyódy L., C.M. Paulsen: Cost-Effective Water Quality Management Strategies in central and Eastern Europe. IIASA Working Paper, WP-92-091, Dec. 1992.

- [85] Somolyódy L., O. Varis: Water Quality Modeling of Rivers and Lakes. IIASA Working Paper, WP-92-041, June 1992.
- [86] Stedinger J.R., B.F. Sule, D.Pei: Multiple Reservoir System Screening Models. *Water Resources Research*, vol. 19, no 6, pp 1383-1393, dec. 1983.
- [87] Stedinger J.R.: The performance of LDR models for preliminary design and reservoir operation. *Water Resources Research*, Vol. 20, no.2, pp. 215-224, 1984.
- [88] Strycharczyk J.B., J.R.Stedinger: Evaluation of a reliability programming reservoir model. *Water Resources Research*, vol.23, no 2, pp 225-229, 1987.
- [89] Subbotin A.I., A.G. Czencow: Optimizacija garantii w zadaczach uprawlenija. "Nauka", Moskwa, 1981.
- [90] Tamura H.: A Discret Dynamic Model with Distributed Transport Delays and its Hierarchical Optimization for Preserving Stream Quality. *IEEE Transaction Systems, Man, Cybernetics*, 4, pp 424-431, 1974.
- [91] Tarassov V.J., H.J. Perlis, B. Davidson: Optimization of a class of River Aeration Problems by the Use of Multivariable Distributed Parameter Control Theory. *Water Resources Research*, 5, pp 563-573, 1969.
- [92] Varis O.: Decision Analytic Modeling of uncertainty and Subjectivity in Water Quality Management. IIASA Working Paper, WP-92-054, Aug. 1992.
- [93] Wierzbicki A.P.: Multi-Objective Modeling and Simulation for Decision Support. IIASA Working Paper, WP-92-080, Oct. 1992.
- [94] Whitehead P., P.Young: Water Quality in River Systems: Monte-Carlo Analysis. *Water Resources Research*, vol. 15, no 2, pp 451-459, 1979.
- [95] Woropajew G.W., G.Ch. Ismaiłow, W.M. Fiedorow: Razwitije wodochozjajstwiennych sistiem. Metody analiza i ocenki effiektiwnosti ich funkcionirowanija. "Nauka", Moskwa, 1989.
- [96] Young P., B. Beck: The Modelling and Control of Water Quality in River System. *Automatica*, 10, pp 455-468, 1974.

Michał Inkielman

SYMULACYJNE METODY ANALIZY STEROWANYCH
WIELOZBIORNIKOWYCH SYSTEMÓW WODNYCH

Praca stanowi opracowanie syntetyczne badań nad zastosowaniem metod obliczeniowych i symulacyjnych do rozwiązywania zadań sterowania zasobami wodnymi w skali regionalnej w horyzoncie rocznym i wieloletnim. Celem pracy jest przedstawienie metodologii modelowania systemowego w zastosowaniu sterowania systemem wodnym, który jest systemem hydrologicznym, ekonomicznym, technicznym i ekologicznym równocześnie. Wyniki zaadresowane są do specjalistów i pracowników badawczych pracujących w dziedzinie zastosowania badań systemowych dla gospodarki wodnej. W pracy przedstawiono system wodny jako obiekt sterowania, metody sterowania oraz sposoby oceny efektywności podejmowanych decyzji. Szczególną uwagę poświęcono analizie metod sterowania, opartych na koncepcji tzw. reguł decyzyjnych i zagregowanych modeli optymalizacyjnych oraz ich weryfikacji na drodze symulacji. Rozważane są problemy skuteczności reguł sterowania ocenianych z punktu widzenia różnorodnych kryteriów, w tym także z punktu widzenia wpływu sterowania ilościowego zasobami na parametry jakości wody.

Omówiono także zagadnienia praktyczne związane z budową pakietu komputerowego realizującego zadania konstruowania modeli symulacyjnych, generowania scenariuszy symulacji i analizy wyników. Przy konstrukcji modeli symulacyjnych wykorzystano obiektowo zorientowaną strukturę programu komputerowego i topologię sieci systemu wodnego. Podejście to pozwala formułować modele różnych elementów systemu na dowolnym poziomie szczegółowości, rozwijać je lub agregować, w zależności od potrzeb i dostępności danych, bez potrzeby przebudowy programu.

ISBN 83-85847-31-6

ISSN 0208-8029

W celu uzyskania bliższych informacji i zakupu dodatkowych egzemplarzy prosimy o kontakt z Instytutem Badań Systemowych PAN,
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa
tel. 36-19-01 w. 241 e-mail: kotuszew@ibspan.waw.pl