

Wpłynęło 03.10.2012 r.
Zrecenzowano 25.01.2013 r.
Zaakceptowano 10.04.2013 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

ZASTOSOWANIE DYNAMICZNEGO MODELU SIECIOWEGO W PROBLEMIE WSPOMAGANIA ŻEGLUGI NA DRODZE WODNEJ ODRY

Włodzimierz WOJAS^{ABDEF}

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Zastosowań Matematyki

Streszczenie

Przedstawiono symulacyjno- optymalizacyjny model do rozwiązania problemu wspomaganie żeglugi na drodze wodnej Odry w warunkach deficytu wody. Problem sterowania pracą zbiorników retencyjnych w celu zasilania przepływu na drodze wodnej Odry był tematem Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego 11.10 „Gospodarka Wodna”, realizowanym w latach 1989–1990. W problemie tym struktura czasów przepływu przez odcinki systemu wodnego odgrywa podstawową rolę w zarządzaniu zasobami wodnymi. Do konstrukcji modelu symulacyjno- optymalizacyjnego zastosowano sieć dynamiczną. W niniejszej pracy zdefiniowano podstawowe terminy matematyczne, niezbędne do konstrukcji modelu. Sformułowano ogólne zasady konstrukcji symulacyjno- optymalizacyjnych modeli sieciowych alokacji zasobów wód powierzchniowych. Porównano symulacyjno- optymalizacyjny model, oparty na sieci dynamicznej z modelem optymalizacyjnym, sformułowanym w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego w latach 1989–1990.

Słowa kluczowe: alokacja zasobów wodnych, bilans wodno-gospodarczy, optymalizacja sieciowa, przepływy w sieciach, sieci dynamiczne, zbiorniki retencyjne

WSTĘP

Ogólna metodyka zarządzania zasobami wodnymi wód powierzchniowych została sformułowana w opracowaniu [Hydroprojekt 1992] wykonanym na zlecenie Ministerstwa Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa. Według tego opracowania, bilans wodno-gospodarczy wód powierzchniowych jest definiowany jako rachunek obejmujący ilościowe i jakościowe porównanie zasobów wód

Do cytowania For citation: Wojas W. 2013. Zastosowanie dynamicznego modelu sieciowego w problemie wspomaganie żeglugi na drodze wodnej Odry. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 13. Z. 2(42) s. 177–190.

powierzchniowych z potrzebami wodnymi użytkowników oraz kształtowanie i alokację tych zasobów z uwzględnieniem potrzeb użytkowników, ich ważności, wymagań środowiska przyrodniczego oraz powiązań z wodami podziemnymi. Zgodnie z tym opracowaniem, rachunek bilansu ilościowego powinien uwzględniać:

- ograniczenia dyktowane względami ekologicznymi, np. zachowanie przepływów nienaruszalnych;
- wynik oddziaływania efektów hydrotechnicznych: zbiorników retencyjnych i przerzutów wody;
- hierarchię potrzeb wodnych, zgodną z ustaloną koncepcją użytkowania wód w rozpatrywanym obszarze;
- oddziaływanie zrzutów wprowadzanych do wód powierzchniowych;
- powiązania z zasobami wód podziemnych.

Zarządzanie zasobami wodnymi jest prowadzone w ramach zlewni rzecznych. Alokacji wody między użytkowników dokonuje się zgodnie z ustaloną hierarchią użytkowania zasobów wodnych. Zachowanie hierarchii oznacza, że dostarczenie wody użytkownikowi umiejscowionemu niżej w hierarchii nie może spowodować wystąpienia ani pogłębienia deficytu wody u użytkownika ważniejszego, tzn. zajmującego wyższą pozycję w hierarchii. Do ilościowego rozdziału zasobów wód powierzchniowych systemu wodno-gospodarczego wykorzystuje się modele symulacyjno- optymalizacyjne, będące liczbowym odwzorowaniem obszarowej struktury systemu wodnego (układu sieci rzecznej, tras przerzutów wody, lokalizacji punktów poboru wody i zrzutów ścieków), uwzględniającym relację pomiędzy zasobami wód powierzchniowych a ich użytkowaniem i ochroną, a także powiązania z wodami podziemnymi.

Niniejsza praca prezentuje część aplikacyjną mojej rozprawy doktorskiej [WOJAS 2008], dotyczącej sterowania pracą zbiorników retencyjnych w celu zasilania przepływów na drodze wodnej Odry. Problem ten był w latach 1989–1990 tematem Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego 11.10 „Gospodarka Wodna”, realizowanym przez CBSiPBW Hydroprojekt oraz Instytut Systemów Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej przy współpracy z Instytutem Geofizyki Polskiej Akademii Nauk [RUTKOWSKI i in. 1990a, b]. Rozwiązanie problemu wymagało uwzględnienia w modelu optymalizacyjnym czasów przepływu wody przez odcinki systemu wodnego oraz strat wody w systemie. Prace podjęte w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego ujawniły brak odpowiedniego modelu optymalizacyjnego, który pozwoliłby w kompleksowy sposób rozwiązywać tego rodzaju problemy. Model taki zaproponowałem w swojej pracy [WOJAS 2008]. Podstawowym narzędziem matematycznym użytym do jego konstrukcji była sieć dynamiczna [AHUJA i in. 1993; ARONSON 1989; FORD, FULKERSON 1969]. To pojęcie nie było wcześniej używane w modelowaniu problemów zarządzania zasobami wodnymi. W pracy [WOJAS 2008] zmodyfikowana została konstrukcja sieci dynamicznej rozwiniętej na czas [AHUJA i in. 1993; ARONSON 1989; FORD, FULKERSON 1969]. W zaproponowanym modelu [WOJAS 2008] uwzględniono

jednocześnie następujące struktury: sieciowo-przestrzenną strukturę systemu wodnego, strukturę czasów przepływu przez odcinki systemu, strukturę strat wody w systemie oraz strukturę priorytetów zadań wodnych. Model uwzględnia też stan początkowy systemu (w tym stany napełnień zbiorników) oraz dopływy wody do systemu w analizowanym okresie czasu (horyzoncie sterowania). Przez połączenie tych wszystkich struktur w jedną kompletną, spójną strukturę powstała wieloetapowa uogólniona sieć dynamiczna (MDGNFM). Informatyczne aspekty analizy danych hydrologicznych w kontekście problemu sterowania pracą zbiorników retencyjnych na drodze wodnej Odry zostały omówione w pracy [WOJAS 2010]. Niniejsza praca prezentuje model symulacyjno- optymalizacyjny dla problemu wspomaganie żeglugi na drodze wodnej Odry dla danych hydrologicznych z lipca 1990 r., będący zastosowaniem modelu MDGNFM do tego problemu. Praca zawiera również porównanie tego modelu z modelem optymalizacyjnym, zaprezentowanym w pracach RUTKOWSKIEGO i in. [1990a, b]. Oprócz skrótu MDGNFM (ang. „multistage dynamic generalized network flow model”), do określenia wspomnianego już wieloetapowego dynamicznego modelu sieciowego z siecią uogólnioną, będę też używał skrótu ORNP (ang. „Odra River Navigation Problem”), do określenia problemu sterowania zrzutami ze zbiorników retencyjnych w celu wspomaganie żeglugi na drodze wodnej Odry w warunkach deficytu wody. Są to oryginalne skróty używane w pracy [WOJAS 2008].

PODSTAWY TEORETYCZNE

W pracy doktorskiej [WOJAS 2008] rozważałem sieci uogólnione ze stratami z łukami równoległymi. Z każdą siecią jest stowarzyszona pewna jednostka czasu J . Pojęcia, które będą używane w dalszej części niniejszej pracy, zostały zdefiniowane następująco:

Graf skierowany jest parą (N, A) złożoną ze zbioru wierzchołków N i zbioru łuków skierowanych A , którego elementy są takimi uporządkowanymi trójkami (v, w, i) , że $v, w \in N$, a i jest liczbą naturalną. Łuki $(v, w, 1)$, $(v, w, 2)$, $(v, w, 3)$, ... nazywane są równoległymi. Jeśli kontekst nie będzie wymagał zapisu (v, w, i) , to dla uproszczenia będzie używany zapis (v, w) .

Ścieżką skierowaną w grafie skierowanym (N, A) nazywa się naprzemienny ciąg wierzchołków i łuków skierowanych: $v_1 - k_1 - v_2 - k_2 \dots - v_{n-1} - k_{n-1} - v_n$, gdzie $v_j \in N$ dla $j = 1, 2, \dots, n$; oraz $k_j = (v_j, v_{j+1}) \in A$ dla $j = 1, 2, \dots, n-1$. Jeśli $v_1 = v_n$ to taką ścieżkę nazywa się cyklem skierowanym.

Siecią czystą nazywa się piątkę (N, A, l, u, J) , gdzie (N, A) jest grafem skierowanym a $l, u : A \rightarrow R_+ \cup \{0\}$ funkcjami dolnych i górnych ograniczeń przepustowości łuków na jednostkę czasu J .

Siecią uogólnioną ze stratami nazywa się szóstkę (N, A, l, u, J, g) , gdzie (N, A, l, u, J) jest siecią czystą, a $g : A \rightarrow [0, 1]$ funkcją reprezentującą straty w sieci.

Liczba $1 - g(k)$, gdzie $k \in A$ nazywa się współczynnikiem strat łuku k . Jeśli $g(k) = 1$ dla wszystkich $k \in A$, czyli współczynniki strat wszystkich łuków, są równe zero, to sieć uogólniona jest de facto siecią czystą.

Niech $v \in N$. Oznaczmy:

$$A(v) = \{(v, w) : w \in N, (v, w) \in A\}; B(v) = \{(w, v) : w \in N, (w, v) \in A\}.$$

Dla uporządkowanej pary funkcji (F, f) gdzie $F, f: A \rightarrow R_+ \cup \{0\}$ dywergencję wierzchołka v definiuje się jako: $\text{div}_{(F, f)}(v) = \sum_{k \in A(v)} F(k) - \sum_{k \in B(v)} f(k)$.

Niech funkcja $r: N \rightarrow R$ reprezentuje zapotrzebowania wierzchołków. Wierzchołek v nazywa się źródłem, gdy liczba $r(v)$ jest dodatnia, odpływem, gdy jest ujemna i wierzchołkiem pośrednim, jeśli jest równa zero. Niech funkcja $c: A \rightarrow R$ reprezentuje koszty przepływów przez łuki sieci na jednostkę J . Liczbę $c(k)$ nazywa się współczynnikiem kosztu łuku k .

Przepływem statycznym na jednostkę J w sieci uogólnionej ze stratami (N, A, l, u, J, g) nazywa się parę funkcji (F, f) , spełniającą warunki:

- 1) $l(k) \leq F(k) \leq u(k)$ dla wszystkich $k \in A$;
- 2) $f(k) = g(k) F(k)$ dla wszystkich $k \in A$;
- 3) $\text{div}_{(F, f)}(v) = r(v)$ dla wszystkich $v \in N$.

Funkcję F nazywa się przepływem wejściowym, a f przepływem wyjściowym. W przypadku gdy $g(k) = 1$ dla wszystkich $k \in A$ to $F = f$ i przepływ jest wtedy pojedynczą funkcją w sieci czystej.

Liczbę $\sum_{k \in A} c(k)F(k)$ nazywa się kosztem przepływu wejściowego na jednostkę J . Jeśli $F = f$ to oznacza koszt przepływu. Przepływ nazywamy przepływem o minimalnym koszcie, gdy jego koszt jest minimalny.

By uwzględnić dynamikę przepływu przez łuki sieci wprowadza się dodatkowo funkcję $T: A \rightarrow R_+ \cup \{0\}$, reprezentującą czasy przepływu przez łuki sieci.

Dynamiczną siecią uogólnioną ze stratami nazywa się strukturę (N, A, l, u, J, g, T) , gdzie (N, A, l, u, J, g) jest siecią uogólnioną ze stratami, a wszystkie czasy $T(k)$, gdzie $k \in A$, są wyrażone w jednostce J .

Do konstrukcji modelu MDGNFM została użyta technika rozwijania sieci dynamicznej na czas, względem ustalonej jednostki czasu. Można powiedzieć, że MDGNFM jest uogólnioną i dostosowaną do problematyki zarządzania zasobami wodnymi wersją rozwiniętej na czas sieci G^p , opisaney w książce AHUJA i in. [1993] na s. 738.

SYMULACYJNE I OPTYMALIZACYJNE MODELE ALOKACJI ZASOBÓW WÓD POWIERZCHNIOWYCH

Modele symulacyjne symulują zachowanie się systemu wodnego w ustalonych warunkach, zgodnie z określoną koncepcją użytkowania wód w danym obszarze. Za pomocą tych modeli bada się, porównuje i modeluje efekty oddziaływania o charakterze: ilościowym, jakościowym, ekologicznym, ekonomicznym czy socjalnym dla różnych alternatywnych scenariuszy alokacji wody. Modele optymalizacyjne optymalizują i selekcjonują alokacje wody na podstawie ustalonego kryterium (kryteriów), uwzględniając warunki (ograniczenia) zdefiniowane dla danego problemu i systemu wodno-gospodarczego. Modele optymalizacyjne muszą na ogół mieć komponentę symulacyjną, umożliwiającą obliczanie numerycznych wartości przepływów hydrologicznych i uwzględnianie warunków bilansu masy. Modele symulacyjne i optymalizacyjne są narzędziami komplementarnymi, dlatego często używane są wspólnie (w postaci jednego kompletnego modelu) jako modele symulacyjno-optymalizacyjne. Literatura związana z tym obszarem tematycznym jest bardzo obszerna [AHUJA i in. 1999; DAI, LABADIE 2001; RABINOWITZ i in. 1992; SUN i in. 1995; YAKOWITZ 1982; YEH 1985]. Wiele modeli optymalizacyjnych było formułowanych w terminologii programowania liniowego, nieliniowego czy sieciowego. W szczególności problemy optymalizacyjne były formułowane jako problemy wyznaczenia przepływu o minimalnym koszcie w sieci, w której ujemne współczynniki kosztów reprezentują priorytety (stopnie ważności) łuków sieci. Wśród wszystkich modeli symulacyjnych i optymalizacyjnych modele sieciowe odgrywają szczególną rolę. Sieć jest naturalnym matematycznym modelem systemu wodnego. „Większość kompleksowych systemów rzecznych może być dokładnie i efektywnie reprezentowana przy użyciu sieciowej struktury złożonej z wierzchołków i łuków” [DAI, LABADIE 2001]. Przepływ w sieci w naturalny sposób reprezentuje proces przepływu wody przez odcinki systemu wodnego. W sieciowych modelach zasobów wód powierzchniowych wierzchołki reprezentują na ogół użytkowników systemu wodnego, czy też mówiąc równoważnie, różne sposoby użytkowania wody (związane z żegluga, rolnictwem, przemysłem, ekologią itd.), jak również punkty dopływu i odpływu wody z systemu oraz punkty połączeń odcinków systemu wodnego. Łuki reprezentują odcinki rzek, kanałów, rurociągów oraz dopływy, odpływy i straty wody w systemie. Czasem wygodnie jest reprezentować użytkowników systemu wodnego wyłącznie za pomocą łuków, a nie wierzchołków. W mojej pracy [WOJAS 2008] użytkownicy systemu wodno-gospodarczego są reprezentowani wyłącznie za pomocą łuków. Do rozwiązania rzeczywistych problemów były konstruowane modele sieciowe różnego typu: uwzględniające straty wody w systemie (np. OKRUSZKO, TYSZEWSKI [1994]; WOJAS [2008]) lub nie (np. CHUNG i in. [1989]), analizujące zachowanie systemu okres po okresie (np. CHUNG i in. [1989]) lub też wielookresowe (np. SUN i in. [1995]). Do rozwiązania problemów optymalizacyjnych używane były sieciowe algorytmy optymalizacyjne.

zacyjne. Najczęściej powszechnie stosowanym algorytmem w problemach alokacji zasobów wodnych, bez uwzględniania strat wody w systemie, jest algorytm „out-of-kilter” [BRENDENCKE i in. 1989; CHUNG i in. 1989; KINDLER 1975; SABAT, CREEL 1991a,b]. Do problemów alokacji zasobów wodnych, modelowanych za pomocą sieci uogólnionych, stosowano algorytm EMNET [HSU, CHENG 2002; SUN i in. 1995], bazujący na sieciowej metodzie simplex, natomiast w mojej pracy [WOJAS 2008] wykorzystałem komercyjny pakiet CPLEX, przeznaczony do rozwiązywania zadań optymalizacyjnych w postaci LP.

DROGA WODNA ODRY

Przedstawiony w niniejszej pracy opis drogi wodnej Odry pochodzi z opracowań RUTKOWSKIEGO i in. [1990a, b]. Opis wykorzystano do konstrukcji modelu symulacyjno-optymalizacyjnego dla danych hydrologicznych z lipca 1990 r. Droga wodna Odry, łącząca Gliwice ze Szczecinem, ma 684 km długości. Biorąc pod uwagę zróżnicowanie zabudowy hydrotechnicznej, głębokości tranzytowych, czyli warunków nawigacyjnych, na odrzańskiej drodze wodnej można wyodrębnić cztery odcinki:

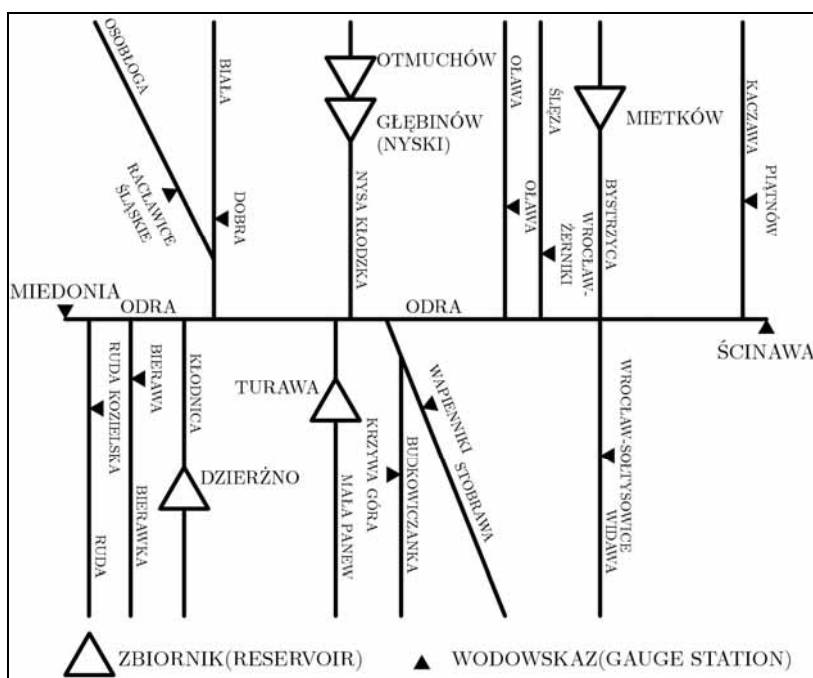
- Kanał Gliwicki pomiędzy Gliwicami a Koźlem o długości 41 km;
- Odrę skanalizowaną od Koźła do Brzegu Dolnego o długości 187 km;
- Odrę środkową, swobodnie płynącą między Brzegiem Dolnym a ujściem Warty o długości 335 km;
- Odrę dolną pomiędzy ujściem Warty i jeziorem Dąbie w Szczecinie o długości 121 km.

Standardową głębokość tranzytową (180 cm) zapewniano (1990 r.), utrzymując odpowiednie piętrzenia na 23 stopniach wodnych. Utrzymywanie wymaganej głębokości żeglugowej na Odrze „swobodnie płynącej” (w rozmiarze 140 cm, minimum 130 cm) wymagało okresowego zasilania przepływów rzeki zrzutami ze zbiorników retencyjnych. Zasilanie to odbywało się w roku przeciętnym w okresie od początku czerwca do połowy grudnia. Wymagana głębokość żeglugowa była mierzona w profilu Ścinawa. Do 1986 r. w zasilaniu Odry brały udział cztery obiekty: Dzierżno Duże na Kłodnicy, Turawa na Małej Panwi oraz zespół Otmuchów-Głębinów na Nysie Kłodzkiej. W 1987 r. do tego systemu włączono zbiornik Mietków na Bystrzycy. Zbiorniki te regulowały odpływ z powierzchni ok. 6000 m². Każdy ze zbiorników ma ustaloną maksymalną wielkość zrzutu (na jednostkę czasu) do alimentacji szlaku żeglugowego. W 1990 r. za utrzymywanie drogi wodnej Odry odpowiedzialna była Okręgowa Dyrekcja Gospodarki Wodnej we Wrocławiu i ona reprezentowała interesy żeglugi. Głównym dysponentem zmagazynowanej w zbiornikach wody był Dział Eksploatacji i Rozrządu Wód ODGW. Dział ten ustalał wielkość zrzutów ze zbiorników w porozumieniu z wchodzącym w jego

skład koordynatorem do spraw żeglugi. Decyzja o wielkości zrzutów była podejmowana z uwzględnieniem informacji o:

- stanie wody i wielkości przepływu w przekroju wodowskazowym Miedonia;
- aktualnym stanie napełnień zbiorników;
- średnich czasach przepływu wody ze zbiorników do stopnia wodnego w Brzegu Dolnym;
- krótkoterminowej prognozie pogody.

Schematyczną reprezentację systemu wodnego górnej Odry przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schematyczna reprezentacja systemu górnej Odry; źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Schematic representation of the Upper Odra River water system; source: own elaboration

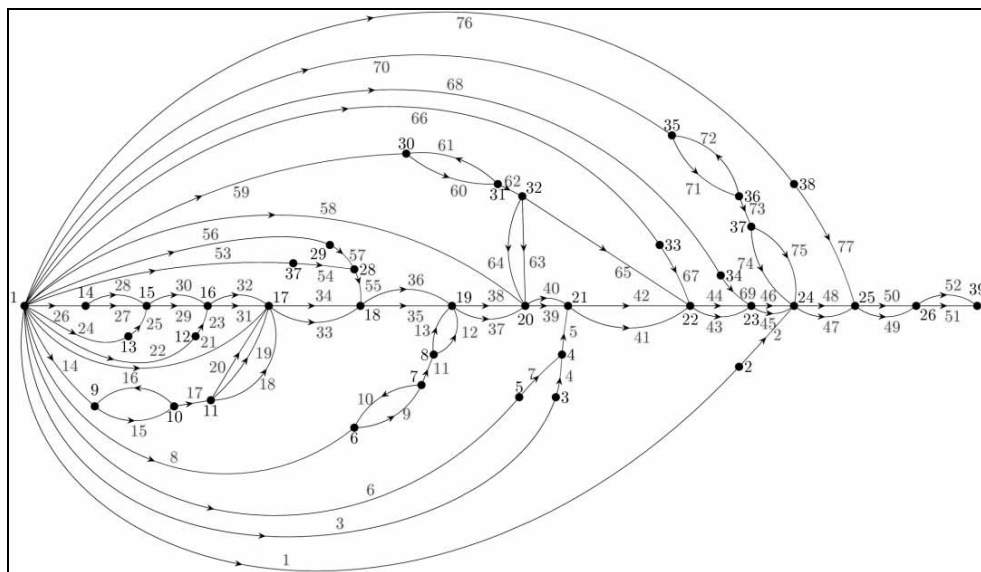
METODYKA DLA ORNP

ORNP jest optymalizacyjnym problemem decyzyjnym krótkoterminowego planowania. Problem w wersji oryginalnej polegał na wyznaczeniu optymalnej strategii zrzutów wody ze zbiorników retencyjnych w systemie górnej Odry, w celu wspomaganie żeglugi na drodze wodnej Odry w warunkach deficytu wody. Przyjęto kilkudobowy horyzont planowania. Zadanie optymalizacyjne dla ORNP można sformułować w następujący sposób: należy wyznaczyć ciąg momentów w anali-

zowanym okresie czasu (horyzoncie sterowania) i minimalne ilości wody zrucane ze zbiorników w przedziałach czasu między kolejnymi momentami tak, aby spełnione były ilościowe wymagania żeglugi oraz innych użytkowników systemu, zgodnie z ustalonymi priorytetami użycia wody w systemie. Założono, że odpływ wody ze zbiorników odbywa się w sposób ciągły oraz, że dla każdego zbiornika i przedziału czasowego ilość wody zrucana ze zbiornika w jednostce czasu (czyli prędkość odpływu wody ze zbiornika) jest stała. Założono również, że znany jest stan początkowy systemu (wielkości przepływów i napełnień zbiorników), wielkości dopływów wody w analizowanym okresie czasu (na podstawie krótkoterminowej prognozy hydro-meteorologicznej) oraz średnie czasy przepływu wody przez odcinki systemu. Model optymalizacyjny dla ORNP powinien uwzględniać następujące elementy: sieciowo-przestrzenną strukturę systemu wodnego, bilans masy w procesie przepływu wody, średnie czasy przepływu wody przez odcinki systemu wodnego, straty wody w systemie, operacje zbiorników retencyjnych (pobór, zrzut), strukturę priorytetów użytkowania wody w systemie oraz stan początkowy systemu. Autorem prac [RUTKOWSKI i in. 1990a, b] nie był znany żaden gotowy model optymalizacyjny, który uwzględniałby wszystkie wyżej wymienione elementy. Standardowe podejścia sieciowe: „okres za okresem” i wielookresowe stosowane w problemach długoterminowego planowania [AHUJA i in. 1999; CHUNG i in. 1989; DAI, LABADIE 2001; SUN i in. 1995] nie są odpowiednie w tym przypadku. Modele oparte na tych podejściach należą do klasy modeli statycznych, tzn. nieuwzględniających czasów przepływów przez łuki sieci. Dlatego też RUTKOWSKI i in. [1990a, b] zdecydowali się na pewne uproszczenia w stosunku do rzeczywistego problemu. W ich pracach rozwiązano ostatecznie pewną uproszczoną wersję problemu oryginalnego. Zaprezentowany w mojej pracy [WOJAS 2008] model MDGNFM daje możliwość rozwiązania problemu ORNP w wersji oryginalnej. Na bazie tego modelu stworzono model symulacyjno-optymalizacyjny dla danych z lipca 1990 r. Przyjęto w nim następującą strukturę priorytetów zadań wodnych:

- ochrona przepływów nienaruszalnych (biologicznych) na odcinkach rzek;
- pobór wody dla Wrocławia;
- żegluga na drodze wodnej Odry;
- ochrona zasobów wodnych zbiornika Mietków;
- ochrona zasobów wodnych zbiornika Otmuchów-Głębinów;
- ochrona zasobów wodnych zbiornika Turawa;
- ochrona zasobów wodnych zbiornika Dzierżno.

Na podstawie schematycznej reprezentacji systemu wodnego górnej Odry (rys. 1) stworzono sieciową reprezentację tego systemu, przedstawioną na rysunku 2. Wierzchołki i łuki skierowane zostały ponumerowane. Rozpatrywana jest sieć z jednym źródłem w wierzchołku 1 i jednym odpływem w wierzchołku 39. Przepływy nienaruszalne reprezentowane są przez łuki równoległe. Cykle skierowane reprezentują poszczególne zbiorniki: cykl $v_9 - k_{15} - v_{10} - k_{16} - v_9$ reprezentuje zbiornik Dzierżno, cykl $v_6 - k_9 - v_7 - k_{10} - v_6$ zbiornik Turawa, cykl $v_{30} - k_{60} - v_{31} -$



Rys. 2. Graf skierowany sieciowej reprezentacji systemu górnej Odry; źródło: opracowanie własne

Fig. 2. The digraph of the network representation of the Upper Odra River water system; source: own elaboration

$k_{61} - v_{30}$ Otmuchów-Głębinów, a cykl $v_{35} - k_{71} - v_{36} - k_{72} - v_{35}$ zbiornik Mietków. Łuki skierowane o numerach 11, 17, 62, 73 reprezentują zrzuty odpowiednio ze zbiorników: Turawa, Dzierżno, Otmuchów-Głębinów, Mietków. Pobór wody dla Wrocławia jest reprezentowany przez łuk 65 ze współczynnikiem strat 0,1. Łuk 52 reprezentuje profil Ścinawa – na tym łuku mierzona jest wielkość przepływu dla celów żeglugowych.

WYNIKI NUMERYCZNE I PORÓWNAWCZE

Model symulacyjno- optymalizacyjny został stworzony na bazie sieci przedstawionej na rysunku 2., danych hydrologicznych z lipca 1990 r., ustalonej struktury priorytetów zadań dla horyzontu sterowania 120 h. W ramach tego modelu wygenerowano zadanie optymalizacyjne w postaci LP z 21 251 zmiennymi decyzyjnymi i 52 995 ograniczeniami. Zadanie optymalizacyjne w modelu symulacyjno- optymalizacyjnym dla ORNP jest zadaniem wyznaczenia przepływu o minimalnym koszcie w rozwiniętej na czas wieloetapowej, uogólnionej sieci dynamicznej ze współczynnikami kosztów na łukach odzwierciedlającymi przyjętą hierarchię priorytetów zadań wodnych. Postać LP zadania została wygenerowana, bazując na macierzowej postaci zadania optymalizacyjnego, za pomocą specjalnie stworzonej w tym celu procedury GENERATOR, zaimplementowanej w języku programowa-

nia pakietu Mathematica 5.0. Czas generowania zadania na komputerze PC z systemem Windows XP, procesorem Pentium 4, zegarem 2,6 GHz i 512 Mb RAM wyniósł 745,1 s (12,42 min). Zadanie optymalizacyjne zostało rozwiązane za pomocą komercyjnego pakietu CPLEX Linear Optimiser 6.0.2. Czas obliczeń, określany w pakiecie CPLEX jako „solution time”, po wyborze metody sieciowej, na komputerze Sun z systemem Sun OS 4.1.4, procesorem SuperSparc-II, zegarem 75 MHz i 128 MB RAM wyniósł 8,62 s. Wynik został następnie przetworzony do postaci końcowej za pomocą przygotowanej w tym celu procedury RESULT. Procedura ta podaje jako wynik końcowy macierz optymalnych, dynamicznych alokacji wody w horyzoncie sterowania dla wybranych łuków. Dla ORNP podawane były wartości przepływu wejściowego na łukach 11, 17, 62, 73, reprezentujących zrzuty ze zbiorników retencyjnych. Przyjęta w modelu symulacyjno-optymalizacyjnym wymagana wielkość przepływu w profilu Ścinawa do celów żeglugowych wynosiła $648\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Macierz optymalnych, dynamicznych zrzutów ze zbiorników retencyjnych, w celu wspomagania żeglugi na drodze wodnej Odry, podano w tabeli 1.

Tabela 1. Optymalne zrzuty ze zbiorników retencyjnych dla okresu 120 h

Table 1. Optimal dynamic water releases from retention reservoirs for the period 120 hours

Zbiornik Reservoir	Zrzut ($10\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) w przedziale czasowym (h) Release ($10\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) in a time period (h)		
	(0,3)	(3,25)	(25,120)
Turawa	0,3600	13,7664	8,7264
Dzierżno Duże	5,4000	5,4000	5,4000
Otmuchów-Głębinów	25,2000	25,2000	25,2000
Mietków	0,5760	0,5760	0,5760

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Porównując model symulacyjno-optymalizacyjny, który powstał na bazie MDGNFM z modelem optymalizacyjnym zaprezentowanym w pracach RUTKOWSKIEGO i in. [1990a, b] można wyróżnić pewne cechy wspólne:

- w obu modelach sterowanie ma charakter repetycyjny i odbywa się w stosunkowo krótkim czasie, nie krótszym niż średni czas przepływu wody przez system;
- w obu modelach założono, że dostępne są prognozy hydrogramów dopływów wody do systemu dla przyjętego horyzontu sterowania, znane są średnie czasy przepływu wody przez odcinki systemu oraz stany napełnień zbiorników;
- w obu modelach przyjęto podobny model transformacji przepływu; w modelu z 1990 r. przyjęto model transformacji przepływu dla drogi wodnej Odry jako łańcucha kolejnych odcinków uważanych za rozłączne, co oznacza powiązanie ich tylko przez wydatki na wejściach i wyjściach (ruch wody na odcinku dolnym nie wpływa na odcinek górny); wydatek wyjściowy z i -tego odcinka jest wydat-

kiem wejściowym dla odcinka o numerze $i + 1$; odcinki dopływów traktuje się jako niezależne od przepływu Odry; w modelu symulacyjno- optymalizacyjnym struktura systemu wodno-gospodarczego jest reprezentowana przez sieć – pewną liczbę punktów (wierzchołków) i odcinków (łuków), wzajemnie ze sobą powiązanych; sieć ma jedno źródło i jeden odpływ; obowiązuje ta sama zasada rozłączności odcinków; w każdym wierzchołku pośrednim (różnym od źródła i odpływu) bilans wydatków wejściowych i wyjściowych jest równy zero.

Zasadnicze różnice między modelami są następujące:

- model z 1990 r. ma w zasadzie charakter jednorazowy; jest on skonstruowany do rozwiązania konkretnego, pojedynczego problemu; wykorzystuje w istotny sposób szczególną specyfikę usytuowania zbiorników w systemie wodnym Odry; model symulacyjno- optymalizacyjny bazuje na modelu MDGNFM, który powstał jako narzędzie optymalizacyjne dla szerszego spektrum problemów alokacji zasobów wodnych; struktura przestrzenna sieci wodno-gospodarczej oraz usytuowanie zbiorników w systemie mogą być w zasadzie dowolne;
- model symulacyjno- optymalizacyjny reprezentuje (odwzorowuje) w kompleksowy sposób następujące struktury: sieciowo- przestrzenną strukturę systemu wodnego, strukturę czasów przepływu przez odcinki systemu wodnego, strukturę strat wody na odcinkach systemu; w modelu z 1990 r. struktury te są reprezentowane tylko w sposób fragmentaryczny;
- model z 1990 r. jest w zasadzie modelem jednozadaniowym; został stworzony do rozwiązania pojedynczego problemu – sterowania zrzutami ze zbiorników retencyjnych w celu zasilania drogi wodnej Odry; model symulacyjno- optymalizacyjny jest modelem wielozadaniowym; umożliwia jednoczesne rozważanie, w sposób kompleksowy, wielu zadań, zgodnie z ustaloną strukturą priorytetów zadań wodnych; w modelu tym wymagania dla żeglugi na drodze wodnej Odry to jedno z siedmiu rozpatrywanych zadań;
- kolejność włączania się zbiorników do pracy jest w modelu z 1990 r. założona z góry; kolejność ta jest uzależniona od tzw. opóźnienia czasowego, reprezentującego czas przepływu wody od zbiornika do profilu Ścinawa; w pierwszej kolejności wykorzystywany jest zbiornik Dzierżno, dla którego opóźnienie jest największe; jako ostatni włączany jest zbiornik Mietków, dla którego opóźnienie czasowe jest najmniejsze; w modelu symulacyjno- optymalizacyjnym kolejność włączania się zbiorników do pracy nie jest arbitralnie zakładana z góry; wynika ona z przyjętej struktury priorytetów zadań wodnych, reprezentowanej przez współczynniki kosztów na łukach sieci;
- w modelu z 1990 r. zakłada się sterowanie pracą zbiorników z krokiem czasowym ustalonym z góry; dopuszczalne wartości kroku czasowego to 6, 12 lub 24 h; w modelu symulacyjno- optymalizacyjnym wielkość podstawowego kroku czasowego nie jest zakładana z góry tylko dobierana optymalnie na podstawie czasów przepływu wody przez odcinki systemu oraz długości poszczególnych etapów; dla danych z lipca 1990 r. długość kroku czasowego wyniosła 1 h;

– w modelu z 1990 r. zadanie optymalizacyjne jest zadaniem programowania nieliniowego (NLP); zadanie to próbowano początkowo rozwiązać za pomocą algorytmu opartego na metodzie Powella, z przesuwaniem funkcji kary; ze względu na długi czas obliczeń zrezygnowano z tego algorytmu na rzecz własnej metody, wykorzystującej specyfikę zadania w systemie wodnym Odry; w modelu symulacyjno-optymalizacyjnym zadanie optymalizacyjne jest zadaniem wyznaczenia przepływu o minimalnym koszcie w rozwiniętej na czas wieloetapowej, uogólnionej sieci dynamicznej; jest to więc zadanie programowania liniowego (LP).

Bezpośrednie porównywanie numerycznych wyników, uzyskanych dla identycznych danych wejściowych, w tych dwóch różnych modelach nie wydaje się być sensowne. Przyjęcie bowiem tak różnych założeń prowadzi w istocie rzeczy do sformułowania (a następnie rozwiązania) dwóch różnych zadań optymalizacyjnych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy zaprezentowano model symulacyjno-optymalizacyjny dla problemu sterowania zrzutami ze zbiorników retencyjnych, w celu wspomagania żeglugi na drodze wodnej Odry, w warunkach deficytu wody. Symulację przeprowadzono na podstawie danych hydrologicznych z lipca 1990 r. Model symulacyjno-optymalizacyjny powstał na bazie modelu MDGNFM, sformułowanego we wcześniejszej pracy WOJASA [2008]. W niniejszej pracy sformułowano ogólne zasady konstrukcji symulacyjno-optymalizacyjnych modeli alokacji wód powierzchniowych ze szczególnym uwzględnieniem modeli sieciowych. Porównano model symulacyjno-optymalizacyjny dla ORNP z modelem optymalizacyjnym zaprezentowanym w pracach RUTKOWSKIEGO i in. [1990a, b].

Sformułowano następujące wnioski końcowe.

1. Rozwiązanie problemu ORNP, zgodnie z zasadami metodyki zarządzania zasobami wód powierzchniowych, sformułowanymi w opracowaniu Hydroprojekt [1992], wymaga jednoczesnego uwzględnienia: obszarowej struktury systemu wodnego, ograniczeń o charakterze ekologicznym, hierarchii zadań wodnych w rozpatrywanym obszarze, dynamiki oddziaływań zbiorników retencyjnych wprowadzających zrzuty do wód powierzchniowych.

2. Prace nad rozwiązaniem problemu ORNP, podjęte w latach 1989/90 w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego, ujawniły brak odpowiedniego, gotowego do użycia narzędzia optymalizacyjnego, które pozwoliłoby w kompleksowy sposób rozwiązywać tego rodzaju problemy.

3. Stworzenie modelu MDGNFM umożliwiło jednoczesne uwzględnienie w modelu symulacyjno-optymalizacyjnym dla ORNP: sieciowo-przestrzennej struktury systemu wodnego, wielkości przepływów nienaruszalnych, bilansu masy w procesie przepływu wody, strat wody w systemie, czasów przepływu wody przez odcinki systemu, operacji zbiorników retencyjnych (pobór, zrzut) w analizowanym

okresie (horyzoncie sterowania), struktury priorytetów zadań wodnych oraz początkowych wielkości przepływów wody na odcinkach systemu i napełnień zbiorników.

4. Model MDGNFM umożliwił kompleksowe rozwiązanie problemu ORNP w wersji oryginalnej (bez dodatkowych założeń upraszczających).

5. Wynik końcowy dla ORNP jest podany w postaci macierzy optymalnych, dynamicznych alokacji na wybranych łukach w analizowanym okresie czasu (horyzoncie sterowania). Dla łuków zrzutu alokacje te określają wielkości zrzutów wody z poszczególnych zbiorników retencyjnych w ustalonych przedziałach czasu.

6. Rozwiązanie zadania optymalizacyjnego dla ORNP należy uznać za bardzo efektywne numerycznie, biorąc pod uwagę stosunkowo krótki czas generowania zadania do formatu LP oraz bardzo krótki czas rozwiązywania dużego zadania optymalizacyjnego w postaci LP, który wynosił 8,62 s. Jest to w znacznym stopniu zasługa samej metody – sformułowania zadania optymalizacyjnego jako problemu sieciowego wyznaczenia przepływu o minimalnym koszcie.

LITERATURA

- AHUJA R.K., ORLIN J.B., MAGNANTI T.L. 1993. Networks flows. Prentice Hall, Englewood Clifs, N.J. ss. 846.
- AHUJA R.K., ORLIN J.B., SECHI G.M., ZUDDAS P. 1999. Algorithms for the simple equal flow problem. *Management Science*. Vol. 45. No. 10 s. 1440–1445.
- ARONSON J.E. 1989. A survey of dynamic network flows. *Annals of Operations Research*. Vol. 20 s. 1–66.
- BRENDECKE C.M., DEOREOE W.B., PAYTON E.A., ROZAKLIS L. 1989. Networks models of water rights and system operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 115. Iss. 5 s. 684–698.
- CHUNG F.I., ARCHER M.C., DEVRIES J.J. 1989. Network flow algorithm applied to California Aqueduct simulation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 115. Iss. 2 s. 131–147.
- DAI T., LABADIE J.W. 2001. River basin network model for integrated water quantity/quality management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 127. Iss. 5 s. 295–305.
- FORD L. R., FULKERSON D. R. 1969. *Przepływy w sieciach*. Warszawa. PWN ss. 256.
- HSU N.-S., CHENG K.-W. 2002. Network flow optimisation model for basin-scale water supply planning. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 128. Iss. 2 s. 102–112.
- Hydroprojekt 1992. *Metodyka jednolitych bilansów wodno-gospodarczych*. Warszawa. CBSiPBW Hydroprojekt.
- KINDLER J. 1975. The out-of-kilter algorithm and some of its applications in water resources. IIASA Working Paper WP-75-19.
- OKRUSZKO T., TYSZEWSKI S. 1994. Using and optimisation model in the management of water resources in the Middle Biebrza River Basin. W: *Proceedings of the International Symposium: Conservation and Management of Fens*. Warsaw-Biebrza Poland s. 50–59.
- RABINOWITZ G., MEHREZ A., RABINA A 1992. A nonlinear heuristic short-term model for hydroelectric energy production: the case of the Hazbani-Dan Water System. *Management Science*. Vol. 38. No. 3 s. 419–438.

- RUTKOWSKI M., ŚLIWA A., TYSZEWSKI S. 1990a. Zasady optymalnego sterowania zespołem zbiorników retencyjnych zasilających odrzańską drogę wodną i założenia dla centrum sterowania. Warszawa. CBSiPBW Hydroprojekt.
- RUTKOWSKI M., ŚLIWA A., TYSZEWSKI S. 1990b. Computer support of decision process in reservoir outflow control of flow alimentionation on Odra River water-way. Warszawa. CBSiPBW Hydroprojekt.
- SABET H., CREEL C.L. 1991a. Model aggregation for California State Water Project. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 117. Iss. 5 s. 549–565.
- SABET H., CREEL C.L. 1991b. Network flow modelling of Oroville Complex. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 117. Iss. 3 s. 301–319.
- SUN Y.-H., YEH W. W.-G, HSU N.-S., LOUIE P. W.-F. 1995. Generalized network algorithm for water-supply-system optimisation. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 121. Iss. 5 s. 392–398.
- WOJAS W. 2008. Multistage dynamic generalized network flow model for a short-term planning of water resources allocation. Rozprawa doktorska. Warszawa. IBS PAN ss. 107.
- WOJAS W. 2010. Computer analysis of hydrological data in Odra River navigation problem. Informatyczne aspekty analizy danych. Warszawa. SGGW. Katedra Informatyki s. 80–98.
- YAKOWITZ S.J. 1982. Dynamic programming applications in water resources. Water Resources Research. Vol. 18. Iss. 4 s. 673–696.
- YEH W. W.-G. 1985. Reservoir management and operations models: a state-of-art review. Water Resources Research. Vol. 21. Iss. 12 s. 1797–1818.

Włodzimierz WOJAS

**APPLICATION OF THE DYNAMIC NETWORK MODEL
FOR A PROBLEM OF SUPPORTING NAVIGATION
ON THE ODRA RIVER WATERWAY**

Key words: dynamic networks, network flows, network optimisation, reservoirs, water resources allocation, water system balance

S u m m a r y

This paper presents simulation-optimisation model for the problem of supporting navigation on the Odra River waterway in the period of water shortage. The problem of reservoirs control for flow alimentionation on the Odra River waterway was a topic of the Central Research and Development Programme 11.10 “Water Resources Management” realised in 1989/1990. In this problem the structure of transit time in water transhipment through the segments of water system plays a key role in water management. Dynamic network was applied to construct the simulation-optimisation model. In this paper we define basic mathematical terms needed for the construction of the model. General principles of construction of simulation-optimisation network models of surface water resources allocation were formulated. We compared the simulation-optimisation model based on dynamic network with the optimisation model formulated in the framework of the Development Programme 11.10 in 1989/1990.

Adres do korespondencji: dr W. Wojas, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Zastosowań Matematyki, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; tel. + 48 22 593-50-21, e-mail: Wlodzimierz_Wojas@sggw.pl