ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983

Seria : AUTOMATYKA z.69 Nr kol. 768

JERZY STRYCHARCZYK
INSTYTUT GEOFIZYKI PAN

OPERACYJNY ROZRZĄD WODY W MODELU SIECI RUROCIĄGÓW MAGISTRALNYCH WODOCIĄGU KATOWICKIEGO

Streszczenie.
W artykule przedstawiono sformułowanie i metodę rozwiązania zadania operacyjnego rozrządu wody w modelu wodociągu katowickiego, opracowanym w IMiGW Kraków. Zadanie rozrządu sformułowano jako zadanie optymalizacji dynamicznej z jednostką czasu równą 8 godzin, na horyzoncie 7 dni, w sieci przedstawionej na rys. 2. Napisano i uruchomiono na przykładowych danych program w FORTRAN-ie, rozwiązujący zadanie rozrządu operacyjnego. Algorytm w tym sformułowaniu jest gotowy do próbnego zastosowania. Rozrząd operacyjny wody w sieci rurociągów magistralnych stanowi część zadania planowania retencji w całym okręgu. Model jest modyfikowany w celu włączenia go do wielopoziomowego zadania planowania retencji opisanego w [4].

1. WPROWADZENIE

Rozrząd wody w aglomeracji miejsko-przemysłowej GOP stanowi jedno z głównych zadań postawionych w Programie Rządowym PR-7, w ramach którego powstał także model przedstawiony w tej pracy.

Przez rozrząd operacyjny rozumie się tutaj decyzje o rozpływie wody w sieci, podejmowane co 8 godzin jako zadane wielkości przerzutów, napełnień i poborów.

Wykorzystany w tej pracy uproszczony model matematyczny wodociągu katowickiego został zaproponowany w sprawozdaniu [1] IMiGW Kraków. Obecna publikacja stanowi sprawozdanie z prac [2,3] pani mgr Elżbiety Mrówki z IMiGW Warszawa, która zaproponowała wykorzystanie wspomnianego wyżej modelu do celów operacyjnego rozrządu wody, oraz prac autora, który nieznacznie rozwinął i zrealizował jej koncepcję.

Przez sieć rurociągów magistralnych rozumie się zespół rurociągów łączących grupowych odbiorców wody z bardzo odległymi ujęciami wody. W modelu pomija się wodociągi miast lub grup miast jako łączące odbiorców z przeznaczonymi dla nich ujęciami.
Przez nazwę wodociąg katowicki rozumie się, zgodnie z [1], następujące wodociągi: Wojewódzkiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Katowicach, MPWiK w Bielsku Białej oraz wodociąg grupowy "Krak".

2. MODEL SIECI RUROCIĄGÓW

Rysunek 1 przedstawia model zaproponowany w opracowaniu [1] przez IMiGW Kraków. Schemat sieci przyjęty do modelowania , pokazany na rys. 2 , jest uproszczony, gdyż jednolicie oznaczono ujęcia wód podziemnych i powierzchniowych oraz zagregowano blisko położonych odbiorców wody.

Na rys. 2 zastosowano następujące oznaczania odbiorców wody i ujęć wody:

odbiorcy wody

w_1 – Gliwice, Zabrze, powiat gliwicki – aglomeracja A

w_2 – Bytom, Chorzów, Czeladź, Piekary Śląskie, Radzionków, Siemianowice, Świętochłowice, powiat tarnowski – aglomeracja B

w_3 – Będzin, Dąbrowa Górnicza, Kazimierz Górniczy, Ząbkowice, Zagórze, Strzemieszyce, powiat będziński – aglomeracja C

w_4 – Katowice, Murcki, Mysłowice, Klimontów, Siemianowice Śląskie, Sosnowiec – aglomeracja D

w_5 – Pyskowice – P

w_6 – Tarnowskie Góry – T

w_7 – Przeczyce, Łazy – W

w_8 – Jaworzno – R

w_9 – R.O.W., Pszczyna, Tychy – S

w_{10} – B.O.P., Bieruń, "Krak", Oświęcim – Z

ujęcia wody

m_1 – Maciejów, Szalsza, Zawada

m_2 – Bibela, Staszic, Rozalia, Bańgów

m_3 – Kozłowa Góra

m_4 – Przeczyce, Łazy

m_5 – Będzin

m_6 – Maczki, Sztoła, Kanał Centralny

m_7 – Brzezinka

z_G – zbiornik Goczałkowice

z_{cz} – zbiornik Czaniec

Rozrząd wody w węzłach sieci, tj. w grupach miast lub okręgach nie jest modelowany. W modelu dokonuje się jedynie bilansu potrzeb i zasobów w każdym okresie ośmiogodzinnym dla każdego węzła sieci. W procesie rozwiązywania zadania operacyjnego rozrządu wody określa się, w jakim stopniu będą pokryte potrzeby lokalne w każdej grupie miast. Stopień pokrycia lokalnych potrzeb zależy od kryteriów wyboru rozwiązania, wyrażonych następnie przez parametry wskaźnika jakości określonego dalej.

3. KRYTERIUM WYBORU ROZWIĄZANIA

Poniżej opisane są elementarne decyzje, które trzeba podjąć dokonując rozrządu wody w modelu sieci oraz wymienione są informacje, na podstawie których decyzje mogłyby być lub są podejmowane. Kryterium matematyczne wyboru rozwiązania będzie sformułowane zgodnie z opisanymi niżej sposobami podejmowania decyzji elementarnych.

a. Jeśli zapotrzebowanie na wodę może być w całości pokryte, to decyzja o gromadzeniu wody w zbiornikach lub ograniczeniu jej poboru może być podjęta na podstawie prognoz zapotrzebowania i dopływu oraz wydobycia w przyszłym tygodniu. Użytkownik modelu podaje sam wartości pożądane zasilania z poszczególnych źródeł i zapełnień zbiorników w formie przedziałami stałej funkcji czasu.

b. Jeśli występuje nadmiar wody, to decyzja o rozdzieleniu tego nadmiaru pomiędzy istniejące zbiorniki może być podjęta na podstawie położenia zbiorników względem miejsc częstego występowania niedoborów.

c. Jeśli dopływy do systemu są niedostateczne, to decyzję o ograniczeniu poborów użytkowników do wartości określonych jako minimalne lub opróżnieniu zbiorników podejmuje użytkownik modelu na podstawie prognoz zaopatrzenia systemu w wodę w następnych tygodniach. Do obliczeń przyjęto, iż zbiorniki byłyby opróżniane.

d. Jeśli występują niedobory wody i minimalne zapotrzebowanie niektórych użytkowników należy obniżyć, to decyduje o tym szczegółowo użytkownik modelu na podstawie praktyki.

e. Jeśli wodę można dostarczyć odbiorcy kilkoma drogami, to decyzję o wyborze źródła lub drogi zaopatrzenia podejmuje użytkownik modelu, na podstawie kosztów transportu wody, ponieważ w modelu pomija się kryterium jakości wody.

f. Jeśli wodę można pozyskać z kilku ujęć o regulowanej wydajności, to decyzję o wyborze ujęcia podejmuje użytkownik modelu na podstawie kosztów eksploatacji ujęć i ich zasobności.

Przyjęliśmy, że kryterium wyboru rozwiązania może być liczbową miarą zaopatrzenia odbiorców w wodę bez interpretacji ekonomicznej.

4. SFORMUŁOWANIE MATEMATYCZNE

Zadanie operacyjnego rozrządu wody w sieci rurociągów magistralnych zostanie poniżej sformułowane jako zadanie optymalizacji dynamicznej.

4.1. Model sieci rurociągów

W modelu sieci rurociągów magistralnych wodociągu katowickiego uwzględnia się dynamikę największych zbiorników, lecz pomija się te, których dynamika jest nieznaczna w ośmiogodzinnym przedziale czasu. Pomija się także zjawiska dynamiczne w rurociągach, gdyż jedno połączenie reprezentuje niekiedy kilka rurociągów, których osobny opis wykraczałby poza formę przejrzystego modelu.

W opracowaniu [4] podano pełne sformułowanie zadania. Poniżej podajemy sformułowanie dyskretne, w którym indeks $n|= 1,\ldots,N$ oznacza chwilę czasu. Jednostką czasu ΔT jest 8 godzin, a horyzont optymalizacji wynosi tydzień, stąd $N = 21$.

Wyróżniliśmy następujące zmienne decyzyjne (sterowania):

m_i^n – $(i=1,\ldots,7)$ wydajność ujęcia wód podziemnych i powierzchniowych ze źródeł "wewnętrznych" systemu

u_j^n – $(j=1,\ldots,12)$ przepływy w rurociągach magistralnych

w_y^n – $(y \in Yw = \{A,B,C,D,P,T,W,R,S,Z\})$ ilość wody przydzielona zespołowemu odbiorcy

$u_j^{n\,mi}$, $\bar{u}_j^n$, $u_j^{n\,ma}$ – $(j=1,\ldots,12)$ minimalne, pożądane i maksymalne przepływy w j-tym rurociągu

$x_y^{n\,mi}$, x_y^o, x_y^n, $x_y^{n\,ma}$ – $(y \in Y_x = \{B,D,M,Z\})$ minimalne, początkowe, pożądane i maksymalne napełnienia zbiorników wody

z_G^n, z_{CZ}^n – wielkości przerzutów wody ze zbiorników Goczałkowice i Czaniec.

Ilość wody zgromadzonej w systemie jest określona przez napełnienia zbiorników (stan systemu):

x_B^n, x_D^n, x_M^n, x_Z^n – zbiorniki: agl. B, agl. D, Mikołów oraz Urbanowice.

Dynamikę sieci opisują równania napełnienia zbiorników (stanu obiektu):

$$B:\quad 0 = (x_B^{n+1} - x_B^n)/\Delta T - (m_3^n + u_2^n + u_4^n - u_5^n - u_6^n - w_B^n) \underset{df}{=} f_B^n$$

$$M:\quad 0 = (x_M^{n+1} - x_M^n)/\Delta T - (-u_9^n + u_{10}^n + u_{12}^n) \underset{df}{=} f_M^n$$

$$D:\quad 0 = (x_D^{n+1} - x_D^n)/\Delta T - (m_7^n + u_6^n + u_8^n + u_{11}^n - w_D^n) \underset{df}{=} f_D^n \qquad /1/$$

$$Z:\quad 0 = (x_Z^{n+1} - x_Z^n)/\Delta T - (-u_{12}^n - w_{10}^n + z_{cz}^n) \underset{df}{=} f_Z^n$$

Sieć rurociągów opisują równania bilansowe (ograniczenia równościowe):

$$P:\quad 0 = m_1^n - u_1^n - w_P^n \underset{df}{=} f_P^n$$

$$T:\quad 0 = m_2^n - u_2^n - w_T^n \underset{df}{=} f_T^n$$

$$W:\quad 0 = m_4^n - u_3^n - w_W^n \underset{df}{=} f_W^n$$

$$A:\quad 0 = u_1^n - u_4^n - w_A^n \underset{df}{=} f_A^n \qquad /2/$$

$$C:\quad 0 = m_5^n + u_3^n + u_5^n + u_7^n - w_C^n \underset{df}{=} f_C^n$$

$$R:\quad 0 = m_6^n - u_7^n - u_8^n - w_R^n \underset{df}{=} f_R^n$$

$$S:\quad 0 = -u_{10}^{n} - u_{11}^{n} - w_{S}^{n} + z_{G}^{n} \underset{df}{=} f_{S}^{n}$$

Z własności fizycznych systemu wynikają ograniczenia na sterowania:

$$\begin{aligned} & m_i^{n\,mi} \leqslant m_i^n \leqslant m_i^{n\,ma} && i = 1,\dots,7 \\ & u_j^{n\,mi} \leqslant u_j^n \leqslant u_j^{n\,ma} && j = 1,\dots,12 \\ & w_y^{n\,mi} \leqslant w_y^n \leqslant w_y^{n\,ma} && y \in Y_w \end{aligned} \qquad /3/$$

i na współrzędne stanu:

$$x_y^{n\,mi} \leqslant x_y \leqslant x_y^{n\,ma} \qquad y \in Y_x \qquad /4/$$

Zmienne decyzyjne wygodnie jest zapisać w formie macierzy ujęć wody M, przepływów U i poborów W.

$$M = \begin{bmatrix} m_1^1 \dots m_1^N \\ \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \\ m_7^1 \dots m_7^N \end{bmatrix} \qquad U = \begin{bmatrix} u_1^1 \dots u_1^N \\ \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \\ u_{12}^1 \dots u_{12}^N \end{bmatrix} \qquad W = \begin{bmatrix} w_A^1 \dots w_A^N \\ \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \\ \cdot \quad \cdot \\ w_Z^1 \dots w_Z^N \end{bmatrix} \qquad /5/$$

4.2. Kryterium wyboru rozwiązania (wskaźnik jakości)

Rozwiązaniem zadania są wartości wydobycia $\hat{M}$, przepływów $\hat{U}$ i poborów $\hat{W}$, które minimalizują pewien wskaźnik jakości działania systemu

$$(\hat{M},\hat{U},\hat{W}) = \arg\ \min\ Q\,(M,U,W) \qquad /6/$$

W pracy [4] zaproponowaliśmy wskaźnik jakości sterowania rozrządem wody o następującej postaci:

$$Q(M,U,W) = \sum_{n=1}^{N} \Big[\sum_{y\in Y_w} \varsigma_y (z_y^n - w_y^n)^2 + \sum_{y\in Y_x} v_y (\bar{x}_y^{n+1} - x_y^{n+1})^2 + \sum_{i=1}^{7} \varepsilon_i (\bar{m}_i^n - m_i^n)^2 + \sum_{j=1}^{12} \eta_j (\bar{u}_j^n - u_j^n)^2 \Big], \qquad /7/$$

w którym $\varsigma_y,\ v_y,\ \varepsilon_i,\ u_j = \text{const.}$

Parametry we wskaźniku jakości. Decyzje a. - f. podejmowane przez użytkownika modelu /programu/ stanowią podstawę do określenia parametrów $\varrho_y,\ v_y,\ \varepsilon_i,\ u_j,\ z_y,\ \bar{x}_y,\ \bar{m}_i,\ \bar{u}_j$. Poniżej proponujemy sposób określania każdego z parametrów.

$\bar{m}_i^n$ - zadawane są jako pożądane zasilania ze źródeł, na podstawie bilansu zapotrzebowań i zapełnień $\bar{x}_y$ z uwzględnieniem decyzji a. e. f.

$\bar{x}_y^n$ – pożądane napełnienia zbiorników zadawane są na podstawie decyzji a. c.

$\bar{u}_j^n$ – pożądane przepływy zadawane są na podstawie decyzji e.; przyjęliśmy dalej, że przepływy $\bar{u}_j^n = 0$.

$\bar{z}_y^n$ – pożądane pobory użytkowników określone są na podstawie prognoz poborów i ewentualnie ograniczane na podstawie decyzji c.

ε_i – wagi przypisane ujęciom wody na podstawie decyzji f. ; przyjęliśmy dalej, że będą to liczby z przedziału $\langle 0{,}1 \; ; 1 \rangle$.

η_j – wagi przypisane rurociągom magistralnym na podstawie decyzji e.; przyjęliśmy, że będą to liczby z przedziału $\langle 1 \; ; 10 \rangle$. Wybranie odpowiednich zbiorników do gromadzenia wody jest więc nadrzędne wobec wyboru źródeł zaopatrzenia.

v_y – wagi przypisane zbiornikom wody na podstawie decyzji a. ; przyjęliśmy, że będą to liczby z przedziału $\langle 10, \; 100 \rangle$. Wybór odpowiednich zbiorników do gromadzenia wody jest więc nadrzędny wobec ewentualnego wyboru między źródłami zaopatrzenia i rurociągami magistralnymi.

ϱ_y – wagi przypisane poszczególnym odbiorcom zgodnie z decyzją c. ; przyjęliśmy, że wszystkie potrzeby użytkowników będą traktowane równorzędnie. Ogólnie $\varrho_y \in \langle 100, \; 1000 \rangle$. Zaspokojenie potrzeb użytkowników jest tym samym nadrzędne wobec wyborów dokonywanych między parametrami dla pozostałych elementów sieci.

Pozostałe parametry występujące w zadaniu rozrządu wody to ograniczenia, które mają większy wpływ na rozwiązanie otrzymane z modelu niż wymienione wyżej parametry dobierane w sposób arbitralny. Powyższe kryterium rozrządu (6) zostało sformułowane w celu ilościowego wyrażenia preferencji, które wpływają na rozrząd wody w dużym systemie. W założeniu nie jest to kryterium ekonomiczne.

5. METODA ROZWIĄZANIA ZADANIA OPTYMALIZACJI

Ze względu na addytywną postać wskaźnika jakości, dynamikę obiektu ograniczającą się tylko do zbiorników oraz dogodną postać ograniczeń postawione zadanie można rozwiązać metodą cen. Pobieżne omówienie tej metody można znaleźć w pracy [3], a szerzej jest ona omówiona w pracach [5,6,7].

Wyznaczenie minimum wskaźnika jakości Q (M,U,W)(7) z ograniczeniami (1) – (4) jest równoważne zadaniu wyznaczenia punktu siodłowego funkcjonału Lagrange'a L:

$$L\,(M,U,W,P) = Q\,(M,U,W) + \sum_{n=1}^{N} \; \sum_{y \in Y_p} p_y^n \cdot f_y^n \qquad /8/$$

gdzie

$$P = \begin{bmatrix} p_A^1 \ldots p_A^N \\ \vdots \\ p_s^1 \ldots p_s^N \end{bmatrix} = \left\{ p_y^n \right\} \begin{matrix} n = 1, \ldots, N \\ y \in Y_p \end{matrix} \qquad /9/$$

oraz $Y_p = \{A, B, C, D, M, R, Z, S\}$

Punkt siodłowy funkcjonału Lagrange'a należy wyznaczać przy ograniczeniach (3),(4) oraz (2)-dla węzłów sieci P,T,W. Można zatem szukać takich sterowań $\hat{M}, \hat{U}, \hat{W}$ i cen $\hat{P}$, które zapewniają osiągnięcie $\hat{L}$:

$$\hat{L} = \max_{p} \left[\min_{M,U,W} L(M,U,W,P) \right] \qquad /10/$$

Powyższe zadanie minimalizacji jest łatwiejsze do rozwiązania niż zadanie (6) i zostało rozwiązane metodą dwupoziomową. Algorytm rozwiązania został zapisany w FORTRANie a program uruchomiony na m.o. R-32. Przykładowy czas wykonania: 3 minuty, potrzebna pamięć 64 K. Dalsze informacje na temat realizacji rozwiązania podane są w opracowaniu [4].

6. ZASTOSOWANIE MODELU

W sformułowaniu zadania podanym wyżej rozrząd wody w sieci jest dokonywany dla zadanych dopływów z_G^n oraz z_{cz}^n $n = 1, \ldots, N$ pochodzących ze zbiorników Goczałkowice i Czaniec. W tym sformułowaniu model został pomyślany do sterowania rurociągami magistralnymi w sieci wodociągów G.O.P, niezależnie od innych elementów systemu wodnego tej aglomeracji miejsko-przemysłowej.

W innym sformułowaniu, podanym w [4], z_G^n oraz z_{cz}^n są także zmiennymi decyzyjnymi ale wagi, które występują przy członach $(\bar{z}_G^n - z_G^n)^2$ i $(\bar{z}_{CZ}^n - z_{CZ}^n)^2$, dodanych do wskaźnika jakości (7), pochodzą z większego wielopoziomowego zadania planowania retencji. Zadanie planowania retencji w modelu G.O.P. zostało sformułowane i rozwiązane w pracach [2,4]. W zadaniu tym wielkości przerzutów wody z Goczałkowic i Czańca do wodociągu katowickiego są wyznaczane w wyniku kompromisu między wszystkimi dużymi odbiorcami wody w G.O.P. Koncepcja sterowania operacyjnego opisana w tej pracy została zrealizowana w celu włączenia jej do rozwiązania wspomnianego zadania planowania retencji w całym okręgu.

Obecnie model w pierwszym sformułowaniu jest gotowy do próbnego zastosowania.

LITERATURA

[1] J. Filimowski, W. Woźniak, R. Krzysztofowicz:/1973/ Model matematyczny systemu zaopatrzenia w wodę G.O.P., IMiGW, Oddział w Krakowie.

[2] K.A. Salewicz, T.Terlikowski, A. Bogobowicz, A. Kozłowski, B. Mrówka:/1980/ Opracowanie i próbne uruchomienie algorytmu sterującego zbiorem modeli dla systemu wodno-gospodarczego w regionie przemysłowym. IMiGW Warszawa. PR 7.01.08.02.

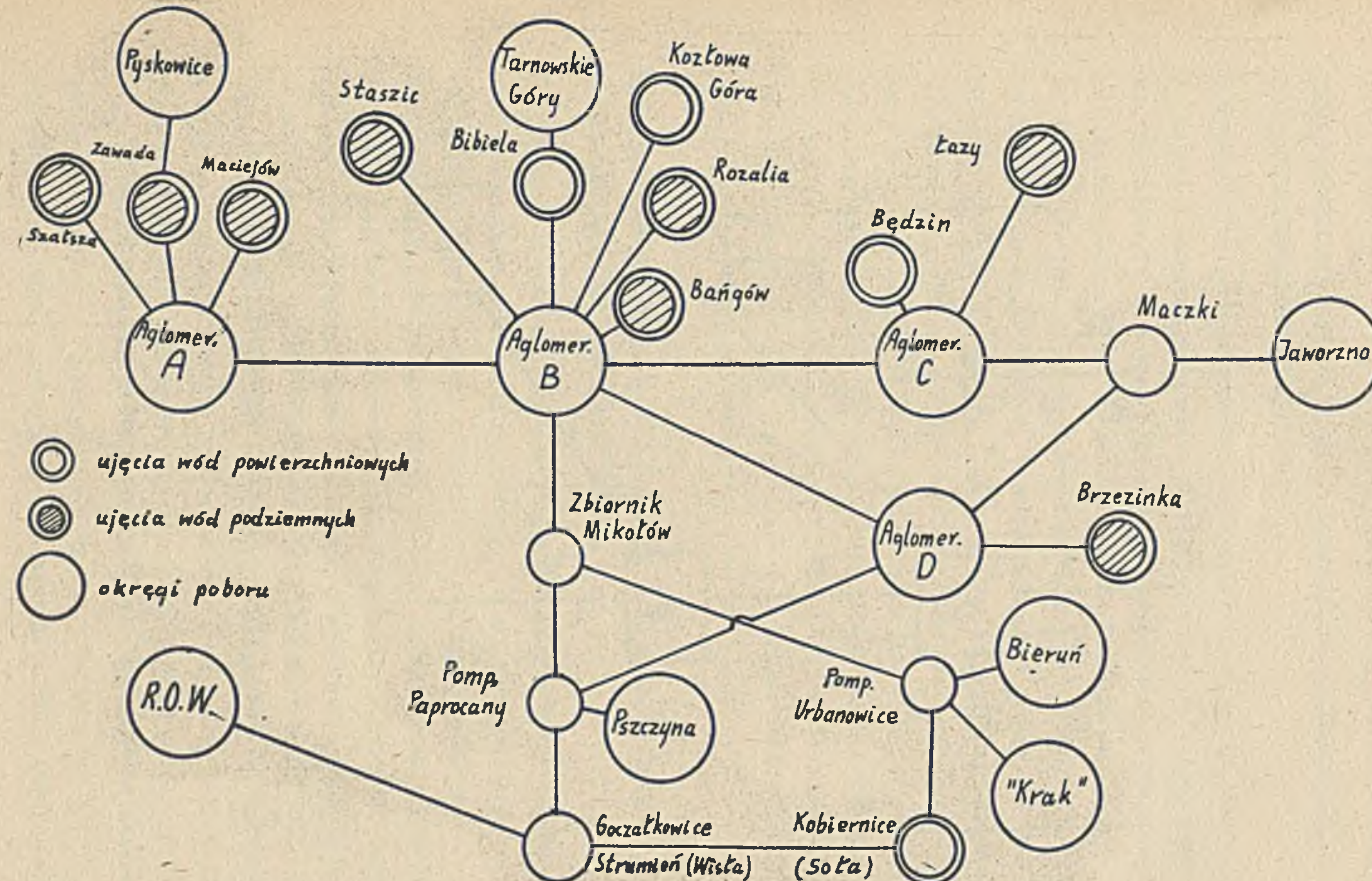
[3] B. Mrówka:/1979/ Model odbiorcy wody - aglomeracja katowicka. IMiGW Warszawa.

[4] K.A. Salewicz, T. Terlikowski, A. Bogobowicz, A. Kozłowski, J. Strycharczyk:/1982/ Opracowanie wstępnej wersji modeli i algorytmów sterowania służących do podejmowania decyzji w sterowaniu operacyjnym systemem. Instytut Geofizyki PAN, Warszawa.

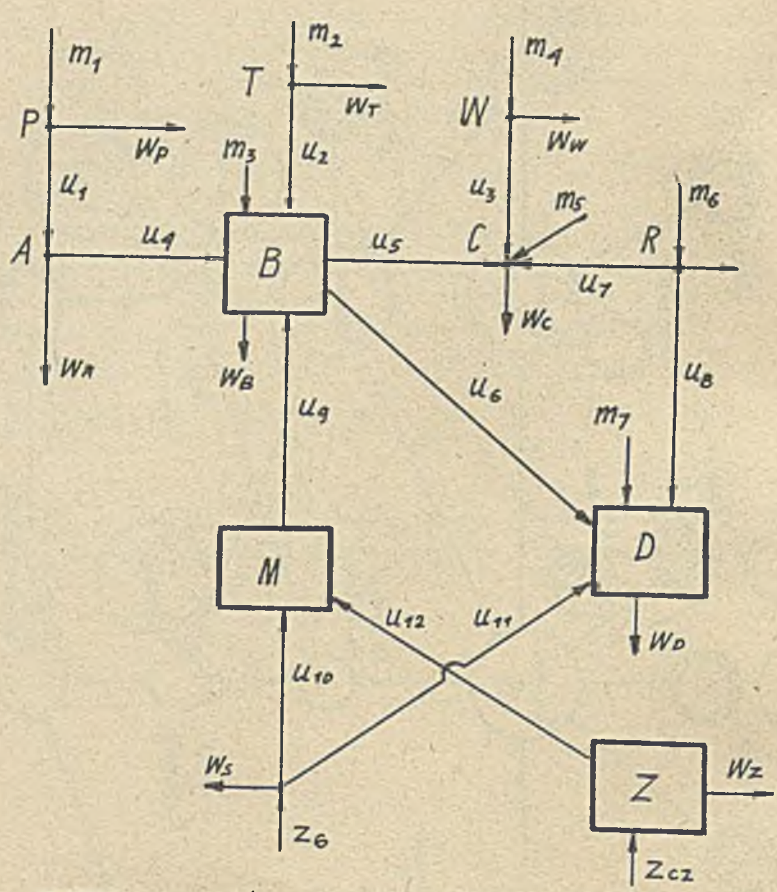
[5] W. Findeisen:/1974/ Wielopoziomowe układy sterowania. PWN, Warszawa.

[6] W. Findeisen, J. Szymanowski, A. Wierzbicki:/1977/ Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji. PWN, Warszawa.

[7] T. Terlikowski:/1976/ Badanie wpływu magazynów na jakość sterowania i koordynacji systemu dynamicznego. Praca magisterska, Instytut Automatyki, Wydział Elektroniki PW, Warszawa.



Rys.1. Schemat sieci zaopatrzenia w wodę wodociągu WPWiK w Katowicach



B — punkty rozdziału wody zaopatrzone w zbiorniki wyrównawcze

P• — statyczne punkty rozdziału wody

Rys.2. Model sieci wodociągowej aglomeracji katowickiej

Operative distribution of water in the water-mains network model of Katowice water-supply system.

Summary. The problem formulation of operative water distribution in Katowice water-supply-system model, developed in Cracow branch of the Institute of Meteorology and Water Management and a method of solution is presented in this paper. The problem of water distribution is formulated as dynamic optimization problem with time-unit equal 8 hours, time-horizon equal 7 days, in the network presented in fig. 2. . An algorithm for solving the operative distribution problem was coded in FORTRAN and was run, example data were used. The algorithm in that formulation is ready for test -application. Operative distribution in water-mains network is a part of water-storage planning problem for the whole Katowice region. Our model is being adapted in the purpose of including it to a multilevel water-storage planning problem described in [4] .

Оперативное распределение воды в модели сети магистральных трубопроводов Катовицково водопровода.

Содержание. В статии представлено формулировку и метод решения проблемы оперативного роспределения воды в модэли Катовицково водопровода, подготовленой в Краковском отделении Института Метеорологии и Водного Хозяйства. Проблему распределения сформулировано в виде проблемы динамической оптимизации, в которой единица времени равна 8 часов, сроком за 7 дней, в сети показанной на рис.2. Написано в языке Фортран и запустено на примерных данных програму, которая разрешивает проблему оперативного распределения. Алгоритм в этой формулировке готов к испытательному применению. Оперативное распределение воды в сети магистральных трубопроводов состовляет часть задачи планирования накапливания воды в резервуарах области Катовице. Модель модифицированный для включения его в иерархическую задачу планирования накапливания воды в резервуарах, описанную в [4] .