ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985
Seria : AUTOMATYKA z. 79 Nr kol. 848

Janina SZEBESZCZYK
Instytut Automatyki
Politechnika Śląska
Mirosław LACHOWSKI
Huta "Katowice"

# OPTYMALIZACJA HARMONOGRAMÓW PRACY POMPOWNI W STACJACH UZDATNIANIA WODY

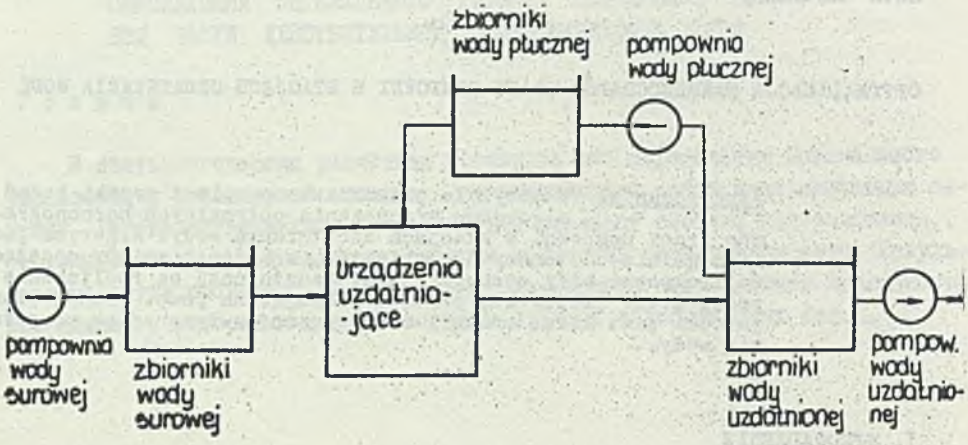
Streszczenie. W artykule przedstawiono opis i wyniki badań algorytmu wyznaczania optymalnych harmonogramów pracy pompowni w stacjach uzdatniania wody. Algorytm jest szczególnie użyteczny dla obiektów, w których zmiany wydajności pompowni wody surowej i wody uzdatnionej są realizowane przez dobór liczby lub zestawu pracujących pomp. Wskaźnikiem jakości jest koszt energii elektrycznej zużywanej na pompowanie wody.

## 1. WPROWADZENIE

Nadrzędnym celem pracy stacji uzdatniania wody (SUW) jest dostarczanie do zasilanej sieci wodociągowej wody o odpowiedniej jakości i w ilości umożliwiającej zaspokojenie zapotrzebowania odbiorców. Uwzględniając ponadto wymagania minimalizacji jednostkowego, zmiennego kosztu produkcji wody, zadanie sterowania pracą SUW może zostać zrealizowane przez 3-warstwowy układ sterowania, zawierający warstwy adaptacji, optymalizacji i sterowania bezpośredniego [1] [2] . W warstwie optymalizacji realizowana jest minimalizacja dobowego kosztu pompowania wody w SUW, przy czym zmiennymi decyzyjnymi są wydajności pompowni : wody surowej, uzdatnionej i płucznej. Rozwiązanie tego problemu dla stacji wodociągowych, w których dla każdej z pompowni możliwa jest ciągła regulacja wydajności, otrzymano stosując algorytm optymalizacji oparty na programowaniu rozdzielnym [1] [3] . W niniejszej pracy zostanie przedstawiony algorytm harmonogramowania wydatków pompowni w SUW opracowany przy założeniu, że zmiany wydajności pompowni wody surowej i wody uzdatnionej realizuje się poprzez zmianę liczby lub zestawu pracujących pomp.

## 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Uproszczony schemat stacji uzdatniania wody można przedstawić jako ciąg technologiczny zawierający : pompownię wody surowej, zbiornik wody surowej, urządzenia uzdatniające (np. mieszacze, komory flokulacji, filtry), zbiorniki wody uzdatnionej, pompownię wody uzdatnionej oraz zbiorniki i pompownię wody płuczącej filtry (rys.1).




Rys.1. Uproszczony schemat technologiczny stacji uzdatniania wody

Ponieważ zarówno zapotrzebowanie na wodę odbiorców, jak i jednostkowy koszt energii elektrycznej zmieniają się w cyklu dobowym, a zbiorniki w stacjach uzdatniania oraz zbiorniki zewnętrzne umożliwiają zgromadzenie zapasu wody na okres nie dłuższy od kilku godzin, zadanie optymalizacji jest realizowane z horyzontem dobowym. Przy podziale doby na $l$ równych okresów harmonogramowania o długości $\Delta t$, problem optymalizacyjny można sformułować jako [1] :

$$\min J = \sum_{k=1}^{l} c_k \sum_{j=1}^{3} P_k (\dot{Q}_{jk}) \Delta t \qquad (1)$$

dla zmiennych decyzyjnych $Q_{jk}$ , $j = 1,2,3$ ; $k = 1, \ldots , l$
przy ograniczeniach :

$$\dot{Q}_{j\,min} \leq \dot{Q}_{jk} \leq \dot{Q}_{j\,max} \tag{2}$$

$$V_{m\,min} \leq V_{mk} \leq V_{m\,max} \qquad m = 1, \ldots, r \tag{3}$$

$$V_{m(k+1)} = V_{mk} + \sum_{j=1}^{3} Q_{jk} \cdot \Delta t \cdot \Psi_{jm} - \sum_{i=1}^{q} Q^{o}_{nk} \cdot \gamma_{im} \tag{4}$$

$$\Psi_{jm} = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli j-ta pompownia dostarcza wodę do m-go zbiornika,} \\ -1 - \text{jeżeli j-ta pompownia pobiera wodę z m-go zbiornika,} \\ 0 - \text{jeżeli j-ta pompownia nie dostarcza ani nie pobiera wody z m-go zbiornika.} \end{cases}$$

$$\gamma_{im} = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli i-ty odbiorca jest zaopatrywany w wodę z m-go zbiornika lub z rurociągu zasilającego ten zbiornik,} \\ 0 - \text{jeżeli i-ty odbiorca nie jest zaopatrywany w wodę z m-go zbiornika.} \end{cases}$$

$$\sum_{k=1}^{l_1} Q_{3k} \geqslant V_p, \sum_{k=1}^{l_2} Q_{3k} \geqslant 2V_p, \ldots, \sum_{k=1}^{l} Q_{3k} = n_p \cdot V_p \tag{5}$$

gdzie :

$c_k$ - cena energii elektrycznej w okresie k-tym [zł/kWh] ,

$Q_{jk}$ - wydajność j-tej pompowni w okresie k-tym [$m^3/h$] ,

$P_{jk}$ - pobór wody przez j-tą pompownię w okresie k-tym [kW] ,

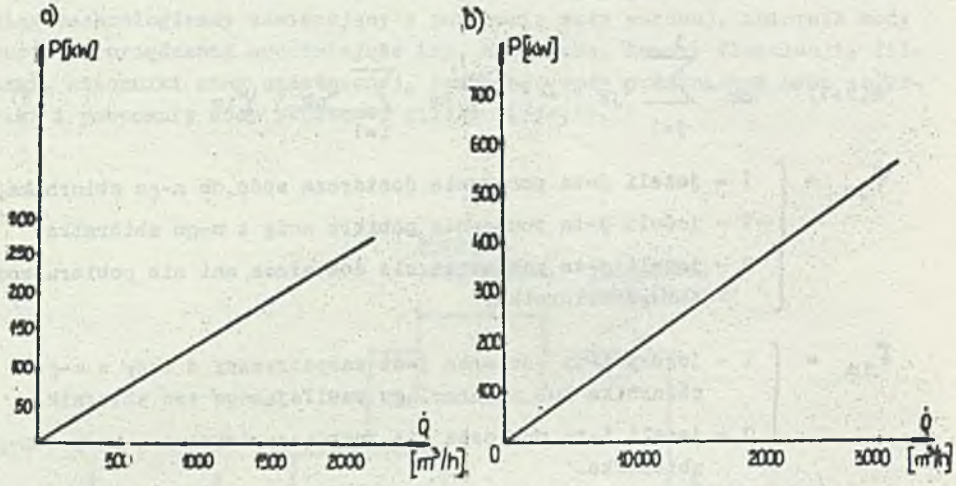
$V_{mk}$ - objętość wody zgromadzona w m-tym zbiorniku na początku okresu k-tego [$m^3$] ,

$Q^{o}_{nk}$ - wartość zaplanowanego poboru wody przez n-tego odbiorcę w okresie k-tym [$m^3$] ,

$n_p$ - liczba filtrów, które powinny zostać wypłukane w ciągu analizowanej doby,

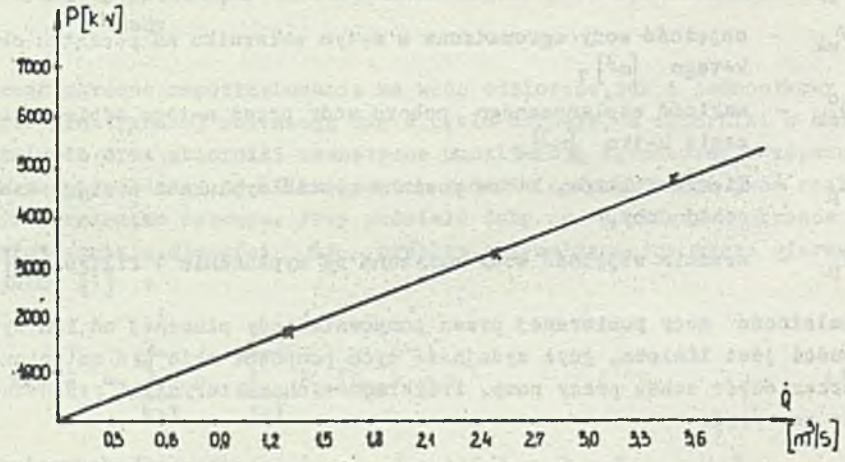
$V_p$ - średnia objętość wody zużywana na wypłukanie 1 filtru [$m^3$].

Zależność mocy pobieranej przez pompownie wody płucznej od ich wydajności jest liniowa, gdyż wydajność tych pompowni może być zmieniana przez dobór czasu pracy pomp. Przykładowe charakterystyki przedstawiono na rys.2.

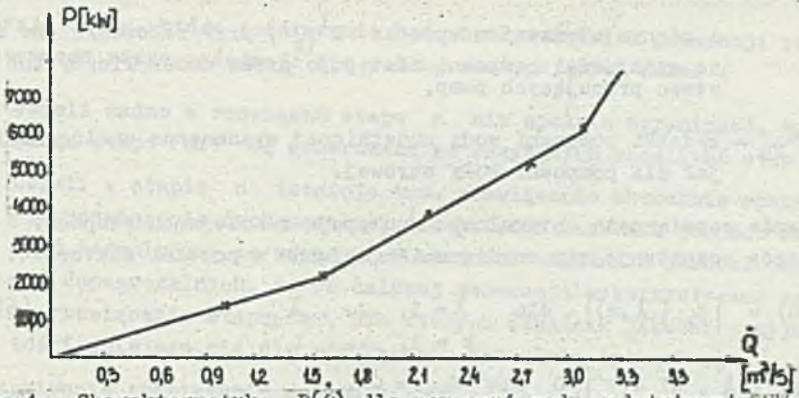



Rys.2. Charakterystyki $P(\dot{Q})$ : a/ dla pompowni wody płuczącej filtry kontaktowe w SUW Kobiernice, b) dla pompowni wody płuczącej filtry kontaktowe w SUW Dziećkowice.

Przykładowe zależności poboru mocy od wydajności pompowni wody surowej i wody uzdatnionej wyznaczone przy założeniu, że zmiany wydajności tych pompowni uzyskuje się zmieniając liczbę lub zestaw pracujących pomp, przedstawiono na rysunkach 3 i 4.




Rys.3. Charakterystyka $P(\dot{Q})$ dla pompowni wody surowej SUW Dziećkowice ( 1 ciąg technologiczny)




Rys.4. Charakterystyka P(Q) dla pompowni wody uzdatnionej SUW Dziećkowice

## 3. ALGORYTM OPTYMALIZACJI

W przypadku minimalizacji kosztu energii elektrycznej w sieciach wodociągowych zawierających pompownie i zbiorniki najlepsze efekty daje zaproponowana w pracach [4] [5] [6] metoda oparta na poszukiwaniu punktu siodłowego funkcji Lagrange'a. Metoda ta jest możliwa do zastosowania przy optymalizacji harmonogramów pracy pompowni sieciowych ze względu na to, że charakterystyki mocy w funkcji wydajności tych pompowni można z wystarczającą dokładnością przybliżyć zależnościami kwadratowymi. Biorąc pod uwagę fakt, że powyższe charakterystyki dla pompowni wody płucznej są liniowe, a dla pompowni wody surowej najlepsze aproksymacje stanowią zależności liniowe, algorytm minimalizacji kosztów pompowania wody w SUW opracowano przy wykorzystaniu innych metod. Rozpatrywane zadanie optymalizacji jest rozwiązywane w dwóch fazach. W fazie pierwszej otrzymuje się rozwiązanie przybliżone w oparciu o minimalizację wskaźnika jakości zawierającego aproksymacje charakterystyk P(Q) dla pompowni wody surowej i wody uzdatnionej. Zależność mocy od wydajności dla pompowni wody surowej można z wystarczającą dokładnością aproksymować funkcją liniową (rys.3), natomiast dla pompowni wody uzdatnionej - 3-odcinkową funkcją wypukłą (rys.4). Dzięki temu do rozwiązania zadania optymalizacji w fazie pierwszej można zastosować metodę programowania rozdzielnego. W fazie drugiej realizuje się poszukiwanie rozwiązania optymalnego w otoczeniu rozwiązania uzyskanego w fazie pierwszej.

Jeżeli $Q^{I}_{1k}$, $Q^{I}_{2k}$ są wydatkami pompowni wody surowej i pompowni wody uzdatnionej w kolejnych okresach harmonogramowania (k = 1, ... , l) uzyskanymi w wyniku optymalizacji problemu rozwiązywanego w fazie pierwszej, to w fazie drugiej rozpatruje się wartości $Q^{d}_{1k}$, $Q^{E}_{1k}$, $Q^{d}_{2k}$, $Q^{E}_{2k}$ dla k = 1, ... , l, przy czym :

$Q^{d}_{1k}$, $Q^{E}_{1k}$ - wydatki pompowni wody surowej będące odpowiednio dolnym

i górnym otoczeniem wydatku $Q^{I}_{1k}$, przy założeniu, że zmiana wydajności pompowni następuje przez dobór liczby lub zestawu pracujących pomp,

$Q^{d}_{2k}$, $Q^{g}_{2k}$ – wydatki pompowni wody uzdatnionej wyznaczone analogicznie jak dla pompowni wody surowej.

Poszukiwanie rozwiązania optymalnego następuje w kolejnych etapach. W każdym z etapów rozpatruje się rozwiązania zapisane w postaci wektorów :

$$P(\lambda, n) = [p_k(\lambda, n)] \quad \text{dla} \quad \lambda = 1, \dots, \lambda_n \quad k = 1, \dots, l \tag{6}$$

$$p_k(\lambda, n) = \begin{cases} 0 & \text{dla } Q_{1k} = Q^{d}_{1k} \\ 1 & \text{dla } Q_{1k} = Q^{g}_{1k} \end{cases} \quad \text{dla } k = 1, \dots, l$$

$$p_k(\lambda, n) = \begin{cases} 0 & \text{dla } Q_{2k} = Q^{d}_{2k} \\ 1 & \text{dla } Q_{2k} = Q^{g}_{2k} \end{cases} \quad \text{dla } k = l+1, \dots, 2l$$

gdzie : n – numer kolejny etapu programowania,

$\lambda$ – numer kolejny rozwiązania w danym etapie.

Dla każdego z rozwiązań $P(\lambda, n)$ bada się spełnienie ograniczeń (3), (4), (5) oraz wyznacza się wartość wskaźnika jakości $J[P(\lambda, n)]$.

W etapie 1 przyjmuje się $P(1,1)$, dla którego $p_k(1,1) = 0$ dla $k = 1, \dots, l$.

Jeżeli dla $P(1,1)$ ograniczenia są spełnione, tj. $P(1,1)$ jest rozwiązaniem dopuszczalnym rozpatrywanego problemu, wówczas jest to rozwiązanie optymalne.

Kolejne rozwiązania etapu n wygenerowane z rozwiązania $P(\lambda, n-1)$ etapu n-1 otrzymuje się przez zastąpienie jednej z kolejnych zerowych współrzędnych wektora $P(\lambda, n-1)$ współrzędną o wartości równej 1, podczas gdy wartości pozostałych współrzędnych tego wektora nie ulegają zmianie.

$$\bigvee_{z \in \langle 1,2l \rangle} [p_z(\lambda, n-1) = 0] \Longrightarrow$$

$$\bigwedge_{\substack{k \neq n \\ k \in \langle 1,2l \rangle}} [p_k(\lambda', n) = p_k(\lambda, n-1)] \wedge [p_z(\lambda', n) = 1] \tag{7}$$

W celu uniknięcia generowania z różnych rozwiązań etapu n-1 rozwiązań identycznych zastosowano procedurę eliminacji rozwiązań identycznych polegającą na porównywaniu odpowiednich współrzędnych wektora $P(\lambda, n)$ w wygenerowanych rozwiązaniach.

$$\bigwedge_{k \in \langle 1,2l \rangle} [p_k(j,n) = p_k(i,n)] \Longrightarrow P(j,n) \quad P(i, n) \tag{8}$$

Decyzję o tym, które rozwiązania będą brały udział w generacji rozwiązań następnego etapu podejmuje się według następujących zasad :

1. Jeżeli żadne z rozwiązań etapu n nie spełnia ograniczeń, to rozwiązania etapu n+1 są generowane ze wszystkich rozwiązań etapu n .
2. Jeżeli w etapie n istnieje tzw. rozwiązanie aktualnie optymalne, tj. rozwiązanie dopuszczalne, dla którego wskaźnik jakości ma wartość najmniejszą ze wszystkich wartości wskaźnika jakości dla rozwiązań dopuszczalnych, to do dalszej generacji wykorzystywane są tylko te rozwiązania etapu n , dla których wskaźnik jakości przyjmuje wartości mniejsze niż dla rozwiązania aktualnie optymalnego.

Poszukiwanie rozwiązania optymalnego może zostać zakończone, jeżeli :

1. Żadne z rozwiązań wygenerowanych w kolejnych etapach nie spełnia ograniczeń. Zakończenie obliczeń następuje po wygenerowaniu rozwiązań ostatniego etapu. W tym przypadku konieczna jest zmiana sposobu regulacji wydajności pompowni, względnie przeanalizowanie możliwości zmiany niektórych ograniczeń (np. dokładności zamknięcia dobowego bilansu wody w zbiornikach).
2. W etapie n istnieje rozwiązanie aktualnie optymalne $P(\lambda, n)$ takie, dla którego wskaźnik jakości ma wartość najmniejszą spośród wartości wskaźnika jakości dla wszystkich rozwiązań etapu n . Rozwiązanie $P(\lambda, n)$ jest wówczas rozwiązaniem optymalnym i proces generacji rozwiązań może zostać zakończony w etapie n .
3. W etapie n istnieje rozwiązanie aktualnie optymalne, a wskaźnik jakości dla wszystkich rozwiązań etapu n+1 przyjmuje wartości wyższe od wartości wskaźnika jakości dla rozwiązania aktualnie optymalnego. Wówczas rozwiązanie aktualnie optymalne jest zarazem rozwiązaniem optymalnym rozpatrywanego problemu i proces generacji rozwiązań może zostać zakończony w etapie n+1 .

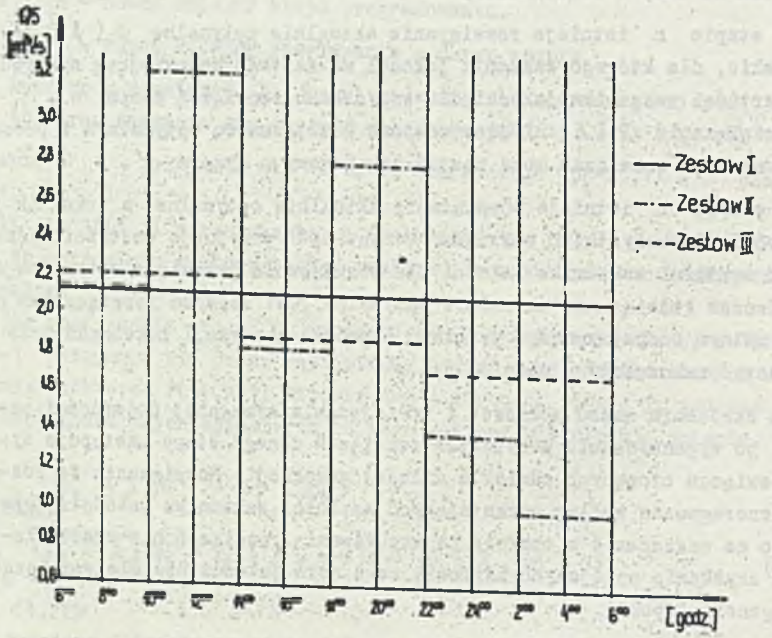
W celu skrócenia czasu obliczeń i zmniejszenia wymaganej pojemności pamięci, po wygenerowaniu wszystkich rozwiązań danego etapu następuje wybór rozwiązań biorących udział w dalszej generacji. Rozwiązania te zostają uszeregowane według narastających wartości wskaźnika jakości. Pozwala to na odrzucanie w trakcie przeszukiwania rozwiązań nie umożliwiających uzyskania mniejszych wartości wskaźnika jakości niż dla rozwiązań już wygenerowanych.

Opisany powyżej algorytm wymaga zapamiętywania rozwiązań i wartości wskaźnika jakości dla etapu bieżącego, etapu następnego oraz rozwiązania aktualnie optymalnego.

## 4. BADANIA ALGORYTMU HARMONOGRAMOWANIA

Powyżej opisany algorytm zastosowano do wyznaczenia optymalnych harmonogramów pracy projektowanej SUW Dziećkowice [7]. Rozpatrzono pracę 2 ciągów technologicznych SUW dostarczających wodę do zbiornika Mikołów. Harmonogramy pracy SUW przebadano dla 3 różnych typów dobowego rozkładu poborów wody (rys.5), i dla różnych wartości pojemności użytkowej zbiornika Mikołów. Jako dopuszczalne zakresy zmian objętości wody w zbiornikach przyjęto :

- dla zbiorników wody surowej : 10 000 $m^3$ (co stanowi ok. 14 [%] całkowitej pojemności użytkowej dla 2 ciągów technologicznych),
- dla zbiorników wody uzdatnionej : 5 000 $m^3$ (co stanowi ok. 18 [%] całkowitej pojemności użytkowej dla 2 ciągów technologicznych),
- dla zbiornika Mikołów : a) 10 000 $m^3$ , b) 15 000 $m^3$ , c) 20 000 $m^3$ ( co stanowi odpowiednio : ok. 10, 15, 20 [%] pojemności zbiornika).




Rys.5. Dobowe rozkłady poborów wody

W obliczeniach uwzględniono koszt energii czynnej pobieranej przez pompownie : wody surowej, wody uzdatnionej, wody płuczącej filtry kontaktowe i wody płuczącej filtry węglowe. Jako obowiązującą do rozliczeń energetycznych przyjęto taryfę EZ/60-A2, dla której cena 1 kWh energii

czynnej wynosi w godzinach szczytu energetycznego 2,75 zł , w godzinach poza szczytem energetycznym - 1,65 zł.

Przyjęto 48-godzinny filtrocykl dla filtrów kontaktowych i 120-godzinny filtrocykl dla filtrów węglowych.

Dla porównania obliczono koszty pompowania wody w SUW przy tradycyjnym sposobie sterowania, zapewniającym najmniejsze wahania poziomów wody w zbiornikach oraz równomierny rozkład terminów płukań filtrów w ciągu doby. Porównanie kosztów pompowania ponoszonych przy sterowaniu metodą tradycyjną oraz przy zastosowaniu zaproponowanego algorytmu przedstawiono w tablicy 1.

| Zestaw nr | Dobowy zmienny koszt pompowania wody w SUW | | Zmiany kosztu dobowego | |
|---|---|---|---|---|
| | K T | K H | zł | % |
| Ia | 353660 | 323360 | 30 300 | 8,57 |
| Ib | 353660 | 323360 | 30 300 | 8,57 |
| Ic | 353660 | 323360 | 30 300 | 8,57 |
| IIa | 353660 | 285780 | 67 880 | 19,19 |
| IIb | 353660 | 288940 | 64 720 | 18,00 |
| IIc | 353660 | 298910 | 54 750 | 15,48 |
| IIIa | 353660 | 266950 | 86 710 | 24,52 |
| IIIb | 353660 | 266950 | 86 710 | 24,52 |
| IIIc | 353660 | 270280 | 83 380 | 23,58 |
| średnio : | | | 51 147 | 16,5 % |

KT - koszt ponoszony przy sterowaniu metodą tradycyjną,
KH - " " " " wg wyznaczonego harmonogramu.

## 5. PODSUMOWANIE

W istniejących na terenie GOP stacjach uzdatniania wody praktycznie jedyną możliwością ciągłej regulacji wydajności pompowni (bez dokonywania zmian w wyposażeniu pompowni) jest obecnie stosowanie dławienia przepływu w rurociągach tłocznych pomp. Celem ograniczenia w możliwie jak największym stopniu tej wysoce niekorzystnej metody realizacji zmian wydajności pompowni, a zarazem dla umożliwienia minimalizacji dobowego, zmiennego kosztu pompowania wody w SUW, opracowano algorytm harmonogramowania pracy pompowni. Otrzymane wyniki obliczeń pozwalają stwierdzić, że zaproponowany algorytm spełnia przyjęte wymagania oraz że może zostać zastosowany w istniejących stacjach uzdatniania wody.

LITERATURA

[1] SZEBESZCZYK J. : Operatywne sterowanie pracą stacji uzdatniania wody. Praca doktorska. Gliwice 1982 (niepublikowane).

[2] SZEBESZCZYK J. : Optimized Control of the Water Treatment Plant. Proceedings of 28-th JUREMA Annual Meeting. Zagrzeb 1983.

[3] SZEBESZCZYK J. : Optimization programming - nonlinear algorithm. IASTED Symposium "Applied Informatics" , Lille 1983.

[4] FALLSIDE F., PERRY P.F. : Hierarchical optimization of a water supply network. Proc. IEE, Vol.122, No 2, 1975.

[5] STERLING M., COULBECK B. : Optimization of water pumping costs by hierarchical methods. Proc.Civ. Engrs. Part 2, No 59, Dec. 1975.

[6] ŻELEZIK J. : Optymalizacja pracy systemu zaopatrzenia w wodę. Zesz.Nauk.Pol.Śl., Automatyka, z.69, Gliwice 1983.

[7] LACHOWSKI M. : Sterowanie pracą pomp i filtrów w stacji uzdatniania wody Dziećkowice. Praca dyplomowa. Gliwice 1984 (niepublikowana).

## OPTIMIZATION OF SCHEDULES OF PUMPING STATIONS WORK IN WATER TREATMENT PLANTS

**Summary**

An optimal schedules design algorithm for pumping stations in water treatment plants is presented and checked. The algorithm is mainly useful for plants in which productivity changes are realized choicing the number or the set of working pumps. The performance index is represented by a cost of electrical energy used for a water pumping.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КАЛЕНДАРНЫХ ПЛАНОВ РАБОТ ВОДОНАСОСНЫХ ПРИВОДОВ НА ВОДООЧИСТНЫХ СТАНЦИЯХ

Резюме

В работе дано описание и представлены результаты исследований алгоритма определения оптимальных календарных планов работ водонасосных приводов на водоочистных станциях. Алгоритм очень пригоден особенно для объектов в которых управление производительностью водонасосных станций сырой и очищеной воды реализуется путём подбора количества или состава работающих насосов . Показателемкачества здесь является стоимость электроэнергии траченной на качку воды.