

Janina Szebeszczyk
Politechnika Śląska

HARMONOGRAMOWANIE PROCESU PRODUKCJI WODY W STACJI UZDATNIANIA Z FILTRAMI KONTAKTOWYMI

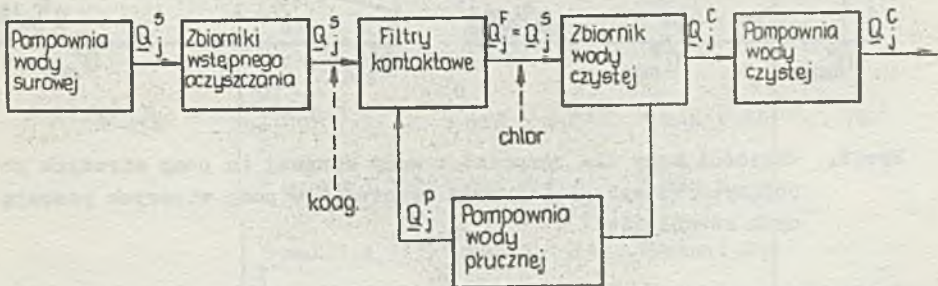
Streszczenie. Artykuł dotyczy problemu tworzenia harmonogramu pracy stacji uzdatniania wody. Przeprowadzono formalizację matematyczną zagadnienia oraz przedstawiono algorytm optymalizacji harmonogramu.

1. Wprowadzenie

Stacje uzdatniania wody (SUW) należą do obiektów wchodzących w skład systemu zaopatrzenia w wodę miasta lub aglomeracji. W koncepcji układu sterowania zaopatrzeniem w wodę aglomeracji Śląska [1] przyjęta została hierarchiczna struktura układu sterowania systemem. Na poziomie nadrzędnym wyznaczane są wartości parametru wiodącego dla SUW w określonych przedziałach czasu oraz opracowywana jest prognoza jakości wody i stanu zasobów dyspozycyjnych. Celem optymalnego sterowania pracą SUW jest realizacja wartości zadanych przez poziom nadrzędny przy minimalnym koszcie produkcji wody w określonym przedziale czasu.

2. Opis procesu i założenia

Uproszczony schemat technologiczny SUW z filtrami kontaktowymi przedstawiono na rys.1.

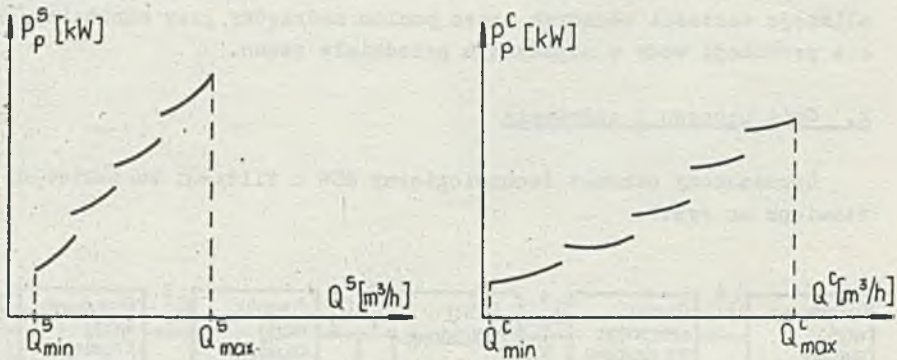


Rys.1. Uproszczony schemat technologiczny SUW

Pompy wody surowej tłoczą wodę z ujęcia do zbiorników wstępnego oczyszczania. Poprzez zastosowanie przelewów obiegowych w zbiornikach tych utrzymywany jest stały poziom. Oczyszczona wstępnie woda spływa grawitacyjnie do filtrów kontaktowych. Przed dopływem wody surowej do filtrów dozowane są koagulanty. Przefiltrowana woda wpływa do zbiornika wody czystej. Do rurociągów wody czystej przed wlotem do zbiornika dozowany jest chlor. Zbiornik wody czystej zasila pompownię wody czystej, która tłoczy produkowaną wodę do sieci rozdzielczej.

Zanieczyszczone złożo filtracyjne poddawane jest płukaniu, po którym następuje proces klarowania filtrowanej wody. W analizowanym obiekcie łączny czas płukania (t_p) i klarowania (t_{kl}) wynosi ok. 1 [h] i w tym czasie filtr jest wyłączony z pracy. Płukanie filtrów odbywa się wodą uzdatnioną pobieraną przez pompy wody płucznej ze zbiornika wody czystej.

Ze względu na wydajność zainstalowanych pomp wody płucznej w określonej chwili czasu może być płukany tylko 1 filtr. Przyjmuje się, że do wypłukania każdego z filtrów zużywana jest jednakowa objętość wody równa V_p [m^3]. Sterowanie wydajnością pomp wody surowej i wody czystej przeprowadzane jest metodą dławieniową. Charakterystyki mocy dla n pomp wirowych pracujących równolegle przy regulacji dławieniowej przedstawiono na rys.2. [2]. Pompy wody płucznej pracują w reżimie załącz - wyłącz.



Rys.2. Wartości mocy dla pompowni : wody surowej (u pomp wirowych pracujących równolegle) i wody czystej (w pomp wirowych pracujących równolegle).

3. Struktura układu sterowania pracą SUW

Przez wprowadzenie podziału czynności sterowania uzyskuje się trójwarstwowy układ sterowania zawierający warstwy : adaptacji, optymaliza-

cji i sterowania bezpośredniego [3].

W warstwie adaptacji realizowane jest :

- a/ wyznaczenie długości filtrocycli dla każdego z filtrów. Wartości te są określane przy uwzględnieniu stanu zanieczyszczenia filtrów oraz stanu aktualnego i prognozy jakości wody surowej;
- b/ wyznaczenie dopuszczalnych średnich dobowych prędkości filtracji na podstawie stanu aktualnego i prognozy jakości wody surowej ;
- c/ aktualizacja charakterystyk pomp i rurociągów.

Zadaniem warstwy optymalizacji jest wyznaczenie harmonogramów pracy: pompowni wody surowej, pompowni wody czystej, pompowni wody płucznej oraz stacji filtrów, zapewniających realizację parametrów zadanych z poziomu nadrzędnego oraz z warstwy adaptacji, przy czym koszt produkcji wody w określonym przedziale czasu powinien być minimalny.

W warstwie sterowania bezpośredniego wypracowywane są wielkości sterujące, umożliwiające zrealizowanie określonych przez warstwę optymalizacji harmonogramów.

4. Realizacja harmonogramowania produkcji wody

4.1. Zmienne wejściowe

Na poziomie nadrzędnym wyznaczane są następujące zmienne wejściowe procesu :

- wektor dobowych wydatków SUW w okresie harmonogramowania : \underline{v}^c

$$\underline{v}^c = [v_1^c \dots v_j^c \dots v_H^c]^T \quad /1/$$

gdzie : v_j^c - zadana wartość produkcji SUW w dobie j-tej [m^3]

- macierze minimalnych i maksymalnych wartości natężeń przepływu produkowanej wody w poszczególnych godzinach doby dla wszystkich dni okresu harmonogramowania ($j = 1, 2, \dots, H$)

$$Q_{\min}^c = \begin{bmatrix} Q_{\min 1 1}^c & \dots & Q_{\min 1 i}^c & \dots & Q_{\min 1 24}^c \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{\min j 1}^c & \dots & Q_{\min j i}^c & \dots & Q_{\min j 24}^c \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{\min H 1}^c & \dots & Q_{\min H i}^c & \dots & Q_{\min H 24}^c \end{bmatrix} \quad /2/$$

$$Q_{\max}^c = \begin{bmatrix} Q_{\max 1 1}^c & \dots & Q_{\max 1 i}^c & \dots & Q_{\max 1 24}^c \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{\max j 1}^c & \dots & Q_{\max j i}^c & \dots & Q_{\max j 24}^c \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{\max H 1}^c & \dots & Q_{\max H i}^c & \dots & Q_{\max H 24}^c \end{bmatrix} \quad /3/$$

$Q^c_{\min j i}, Q^c_{\max j i}$ - minimalna i maksymalna wartość natężenia przepływu produkowanej wody w godzinie i -tej doby j -tej $[m^3/h]$.

- Objętość wody w zbiorniku wody czystej na końcu okresu harmonogramowania : $V^z_{H 24} [m^3]$ /4/

W warstwie adaptacji określone zostają :

- wektor maksymalnych długości filtrocykli dla poszczególnych filtrów \underline{F}

$$\underline{F} = [F_1 \dots F_r \dots F_m]^T \quad /5/$$

F_r - dopuszczalny okres między kolejnymi pęknięciami filtra r -tego [godz]

- wektor maksymalnych średnich dobowych prędkości filtracji \underline{Q}^D

$$\underline{Q}^D = [Q_1^D \dots Q_j^D \dots Q_H^D]^T \quad /6/$$

Q_j^D - maksymalna średnia prędkość filtracji w dobie j -tej (jednakowa dla każdego z filtrów) $[m^3/h]$.

4.2. Optymalizowany wskaźnik jakości

Realizowaną w warstwie optymalizacji minimalizację kosztu produkcji wody sprowadza się do minimalizacji kosztów zmiennych, tj. kosztów zużytych w procesie surowców /koagulantów i chloru/ oraz energii. Wielkości dawek koagulantów uzależnione są od jakości wody surowej i mogą zostać wyznaczone poza systemem sterowania, natomiast dawki chloru określa system nadrzędny. Z powyższych przyczyn minimalizowany wskaźnik jakości zawiera tylko sumaryczny koszt zużycia energii przez pompownie : wody surowej, wody czystej i wody płucznej. Biorąc pod uwagę tygodniową cykliczność zmian zapotrzebowania na wodę, jak również możliwość prognozowania jakości wody surowej, jako horyzont optymalizacji przyjęto okres 1 tygodnia.

Optymalizowany wskaźnik jakości dla SUW można wyrazić następująco :

$$K(\Delta t_H) = K^{PS}(\Delta t_H) + K^{PC}(\Delta t_H) + K^{PP}(\Delta t_H) = \sum_{j=1}^7 (K_j^{PS} + K_j^{PC} + K_j^{PP}) \quad /7/$$

gdzie :

Δt_H - horyzont optymalizacji /okres harmonogramowania/ = 1 tydz.,

$K(\Delta t_H)$ - tygodniowy koszt energii zużywanej przez SUW bezpośrednio do produkcji wody,

$K^{PS}(\Delta t_H) = \sum_{j=1}^7 K_j^{PS}$ - tygodniowy koszt energii zużywanej przez pompownie wody surowej,

$K^{PC}(\Delta t_H) = \sum_{j=1}^7 K_j^{PC}$ - tygodniowy koszt energii zużywanej przez pompownię wody czystej,

$K^{PP}(\Delta t_H) = \sum_{j=1}^7 K_j^{PP}$ - tygodniowy koszt energii zużywanej przez pompownię wody płucznej.

4.3. Algorytm wyznaczania optymalnego harmonogramu pracy SUW

Określenie harmonogramu pracy SUW sprowadza się do wyznaczenia następujących zmiennych decyzyjnych we wszystkich dobach okresu harmonogramowania ($j = 1, 2, \dots, H$):

- macierzy stanu filtrów : $\underline{M}^F Q_j$

$$\underline{M}^F Q_j = \begin{bmatrix} Q_{j 11}^F \cdots Q_{j 1r}^F \cdots Q_{j 1m}^F \\ \vdots \\ Q_{j i1}^F \cdots Q_{j ir}^F \cdots Q_{j im}^F \\ \vdots \\ Q_{j 24 1}^F \cdots Q_{j 24r}^F \cdots Q_{j 24m}^F \end{bmatrix} \quad /8/$$

gdzie : m - liczba filtrów w SUW ,

$$Q_{jir}^F = \begin{cases} 0 & \text{- w godzinie } i\text{-tej filtr } r\text{-ty nie pracuje,} \\ P & \text{- " " " " " jest płukany,} \\ Q_{jir}^F & \text{- " " " " " pracuje z wydajnością } Q_{jir} \text{ [m}^3/\text{h]} \end{cases}$$

- macierzy wydajności pomp wody surowej $\underline{M}^S Q_j$

$$\underline{M}^S Q_j = \begin{bmatrix} Q_{j 11}^S \cdots Q_{j 1a}^S \cdots Q_{j 1u}^S \\ \vdots \\ Q_{j i1}^S \cdots Q_{j ia}^S \cdots Q_{j iu}^S \\ \vdots \\ Q_{j 24 1}^S \cdots Q_{j 24a}^S \cdots Q_{j 24u}^S \end{bmatrix} \quad /9/$$

gdzie : u - liczba pomp w pompowni wody surowej,

Q_{jia}^S - wydajność a -tej pompy wody surowej w i -tej godzinie doby j -tej $[\text{m}^3/\text{h}]$.

Macierze te można otrzymać, wyznaczając uprzednio wektory wydajności pompowni wody surowej Q_j^S

$$Q_j^S = [Q_{j1}^S \cdots Q_{j24}^S]^T \quad /10/$$

- macierzy wydajności pomp wody czystej \underline{M}^c_{Qj}

$$\underline{M}^c_{Qj} = \begin{bmatrix} Q^c_{j11} & \dots & Q^c_{j1b} & \dots & Q^c_{j1w} \\ \vdots & & & & \\ Q^c_{ji1} & \dots & Q^c_{jib} & \dots & Q^c_{jiw} \\ \vdots & & & & \\ Q^c_{j24\ 1} & \dots & Q^c_{j24b} & \dots & Q^c_{j24w} \end{bmatrix} \quad /11/$$

gdzie : w - liczba pomp w pompowni wody czystej,

Q^c_{j1b} - wydajność b-tej pompy wody czystej w i-tej godzinie doby j-tej $[m^3/h]$.

Podobnie jak dla pomp wody surowej, macierze te otrzymać można po uprzednim wyznaczeniu wektorów wydajności pompowni wody czystej Q^c_j

$$Q^c_j = [Q^c_{j1} \dots Q^c_{j24}]^T \quad /12/$$

Wyznaczenie optymalnego tygodniowego harmonogramu pracy SUW przeprowadzane jest w następujący sposób :

1. Zagadnienie układania harmonogramu tygodniowego traktowane jest jako 7-etapowy proces decyzyjny, przy czym poszczególnymi etapami są doby. Stan procesu po etapie j-tym określa wartość objętości wody V^z_{j24} w zbiorniku wody czystej.

Jako zmienną decyzyjną na etapie j-tym przyjmuje się wartość dobowej produkcji stacji filtrów równą dobowej produkcji pompowni wody surowej : V^s_j .

Obowiązuje następujące równanie stanu :

$$V^z_{j24} = V^z_{(j-1)24} + V^s_j - (V^c_j + n^p_j \cdot V_p) \quad /13/$$

gdzie: V_p - objętość wody zużywana do wypłukania jednego filtra $[m^3]$,

n^p_j - liczba filtrów, które powinny zostać wypłukane w ciągu doby j-tej,

oraz ograniczenia :

$$V^z_{\min} \leq V^z_{j24} \leq V^z_{\max} \quad /14/$$

$$V^s_{\min} \leq V^s_j \leq m \cdot Q^D_j \quad /15/$$

gdzie : V^z_{\min} - minimalna objętość wody, która musi się znajdować w zbiorniku wody czystej $[m^3]$,

V^z_{\max} - maksymalna ilość wody, która może być zmagazynowana w zbiorniku wody czystej $[m^3]$,

V^s_{\min} - minimalna wartość dobowej produkcji pompowni wody surowej $[m^3]$.

2. Zagadnienie przedstawione zostaje w postaci grafu, którego wierzchołki opisują wartości współrzędnej stanu V_{j24}^z , natomiast każdą z gałęzi charakteryzują: numer etapu (doby) j oraz wartość zmiennej decyzyjnej V_j^s .
3. Dla wszystkich gałęzi opisanego powyżej grafu wyznaczany jest optymalny harmonogram dobowy, tj. macierze \underline{M}^A_{Qj} , \underline{M}^B_{Qj} , \underline{M}^C_{Qj} . Umożliwia to przyporządkowanie każdej z gałęzi grafu określonej wartości dobowego kosztu energii zużywanej do produkcji wody.
4. Wyznaczenie optymalnego harmonogramu tygodniowego, tj. drogi prowadzącej od początkowego do końcowego wierzchołka grafu i zapewniającej minimalną wartość wskaźnika jakości $K(\Delta t_H)$, realizowane jest metodą programowania dynamicznego. [5].

Wyznaczenie optymalnego harmonogramu dobowego przy zadanej wartości produkcji dobowej stacji filtrów $V_j^s = V_{jq}^s$ opisuje następujący algorytm:

1. Określenie liczby filtrów przewidzianych do płukania w ciągu j -tej doby n_j^D na podstawie analizy kolejnych składowych wektora \underline{F} ;
2. Wyznaczenie liczby filtrów, które powinny pracować w dobie j -tej: n_j^C

$$n_j = \frac{V_{jq}^s}{Q_j^D} \quad /16/$$

Jeżeli n_j jest całkowitoliczbowe, to $n_j^C = n_j$. W przeciwnym przypadku $n_j^C = \text{Ent}(n_j) + 1$.

3. Minimalizacja dobowego kosztu pompowania wody surowej i wody czystej
Realizowane jest następujące zadanie optymalizacji:
wyznaczyć wektory \underline{Q}_j^s , \underline{Q}_j^c , które minimalizują wskaźnik jakości:

$$K_j^{ps} + K_j^{pc} = \sum_{i=1}^{24} k_i \cdot [E^s(Q_{ji}^s) + E^c(Q_{ji}^c)] \quad /17/$$

gdzie:

$E^s(Q_{ji}^s)$ - zużycie energii przez pompownię wody surowej w godzinie i -tej przy wydajności Q_{ji}^s [kWh],

$E^c(Q_{ji}^c)$ - zużycie energii przez pompownię wody czystej w godzinie i -tej przy wydajności Q_{ji}^c [kWh],

k_i - jednostkowy koszt energii elektrycznej w godzinie i -tej [zł/kWh],

pod warunkiem spełnienia zbioru ograniczeń:

$$V_{ji}^s - V_{ji}^c + V_{j(i-1)}^z - V_{ji}^z = 0 \quad /18/$$

- V_{ji}^S - objętość wody wyprodukowana przez pompownię wody surowej w godzinie i -tej doby j -tej [m³],
- V_{ji}^C - objętość wody wyprodukowana przez pompownię wody czystej w godzinie i -tej doby j -tej [m³],
- $i = 1, 2, \dots, 24$; $V_{j0}^S = V_{(j-1)24}^S$

$$V_{\min}^Z - V_{\max}^Z + V_{ji}^C \leq V_{ji}^S \quad /19/$$

$$Q_{\min}^B \leq Q_{ji}^B \leq n_j^C \cdot Q_{P \max} \quad /20/$$

$Q_{P \max}$ - maksymalna wydajność jednego filtru [m³/h]

$$Q_{\min ij}^O \leq Q_{ji}^O \leq Q_{\max ij}^O \quad /21/$$

$$\sum_{i=1}^{24} Q_{ji}^O = V_j^C \quad /22/$$

$$\sum_{i=1}^{24} Q_{ji}^B = V_j^S \quad /23/$$

Jednostkowy koszt zużycia energii k_1 w ciągu doby przyjmuje w analizowanym obiekcie x różnych wartości, przy czym :

$$k_1 < \dots < k_e < \dots < k_x$$

Do wypłukania n_j^P filtrów pompownia wody płucznej zużywa określoną ilość energii równą $n_j^P \cdot E_p$, gdzie E_p [kWh] stanowi zużycie energii na wypłukanie jednego filtru. Minimalizacja dobowych kosztów płukania polega na wyznaczeniu takich godzin płukania filtrów, aby koszt zużytej energii był minimalny. W tym celu do zadania optymalizacji /17/ wprowadza się dodatkowe ograniczenia. Jeżeli możliwa jest realizacja n_j^P płukań w godzinach, w których $k_1 \leq k_e$, to :

$$V_{\min} \leq V_{jl}^Z \leq V_{\max} + V_p \quad /24/$$

$$V_{\min} \leq V_{jh}^Z \leq V_{\max} \quad /25/$$

gdzie : l - numery godzin w ciągu doby, dla których $k_1 \leq k_e$,
 h - "
 "
 "
 $k_1 > k_e$.

Po przeprowadzeniu liniowej aproksymacji charakterystyk mocy pompowni wody surowej i wody czystej przedstawione powyżej zadanie optymalizacji

można rozwiązać metodą programowania rozdzielnego [6]. Jako wynik otrzymuje się wektory pierwotnych wydajności pompowni wody surowej Q_j^{S*} i pompowni wody czystej Q_j^{C*} .

4. Wyznaczenie najpóźniejszych dopuszczalnych terminów płukania filtrów w dobie j-tej i sprawdzenie możliwości ich realizacji przy Q_j^{S*}, Q_j^{C*} . Jeżeli przeprowadzenie wszystkich płukania jest niemożliwe, dokonuje się zmiany ograniczeń /24/ /25/ dla określonych godzin i ponownego rozwiązania zadania optymalizacji /17/.
5. Jeżeli warunek możliwości realizacji n_j^P płukania jest spełniony, wyznaczone zostają macierze wydajności pomp : wody surowej $M_j^S Q_j$ i wody czystej $M_j^C Q_j$.
6. Po porównaniu liczby filtrów pracujących w poprzedniej dobie (n_{j-1}^C) z liczbą filtrów, która powinna pracować w dobie j-tej (n_j^C), następuje określenie terminów załączenia względnie wyłączenia filtrów. Terminy załączenia do pracy dodatkowych filtrów wyznaczane są na podstawie analizy składowych wektora Q_j^S , natomiast wyłączenie zbędnego filtru następuje po jego wypłukaniu. W ten sposób otrzymuje się macierz stanu filtrów w dobie j-tej $M_j^P Q_j$.
7. Wyznaczenie wartości wskaźnika jakości w dobie j-tej .
Sumaryczny koszt pracy pompowni wody surowej i wody czystej ($K_j^{PS} + K_j^{PC}$) wyznaczany jest w kroku 3. Koszt płukania filtrów określa się na podstawie wzoru :

$$K_j^{PP} = \sum_{i=1}^{24} E_p \cdot n_j^P \cdot k_i \cdot Z_i \quad /26/$$

gdzie :

$$Z_i = \begin{cases} 0 & \text{dla } i, \text{ w których } Q_{jir}^P \neq P \\ 1 & \text{dla } i, \text{ w których } Q_{jir}^P = P \end{cases}$$

4.4. Wielkości zakłócające

Jako wielkości zakłócające traktowane są :

- zmiany jakości wody surowej w porównaniu z jakością prognozowaną o wartość większą od określonej wartości granicznej,
- zmiany zapotrzebowania odbiorców.

W przypadku wystąpienia zakłóceń harmonogram pracy SUW zostaje wyznaczony ponownie dla :

- ⁱⁿzmiennych składowych wektora F (przy zmianie jakości wody surowej),
- zmienionych składowych wektora V^C i elementów macierzy Q_{\min}^C, Q_{\max}^C

(przy zmianach zapotrzebowania odbiorców).

5. Podsumowanie

Zagadnienie wyznaczania tygodniowego harmonogramu pracy SUW rozwiązano w oparciu o klasyczne metody optymalizacji. Optymalny harmonogram dobowy może zostać otrzymany jako wynik procesu iteracyjnego, w którym rozwiązywane jest zadanie programowania nieliniowego z modyfikowanymi ograniczeniami.

Przewiduje się, że realizacja przedstawionej koncepcji algorytmu harmonogramowania zapewni zaspokojenie potrzeb odbiorców umożliwiając zarazem lepsze wykorzystanie zdolności produkcyjnych stacji uzdatniania wody.

6. LITERATURA

- [1] Piotrowski J., Pociask U., Sobstel J., Szebeszczyk J. : koncepcja układu sterowania systemem wodno-gospodarczym. Zesz.Naukowe Pol.Śl. Automatyka, zesz.48, Gliwice 1979
- [2] Pociask U. : Wybór rozwiązań układu sterowania przepompownią. Zesz.Nauk.Pol.Śl., Automatyka, zesz.48, Gliwice 1979
- [3] Findeisen W. : Wielopoziomowe układy sterowania. PWN, Warszawa 1974
- [4] Szebeszczyk J. : Koncepcja sterowania pracą stacji uzdatniania wody. Zesz.Nauk.Pol.Śl., Automatyka, zesz.48, Gliwice 1979
- [5] Bellman R., Dreyfus S. : Programowanie dynamiczne. PWE, Warszawa 1968
- [6] Mitchell G.H. : Badania operacyjne. Metody i przykłady. WNT, Warszawa 1977

СОСТАВЛЕНИЕ ГРАФИКОВ ПРОИЗВОДСТВА В ВОДОПРОВОДНОЙ СТАНЦИИ С КОНТАКТНЫМИ ОСВЕТИТЕЛЯМИ

Р е з ю м е

В статье представлена проблема составления графиков производства в водопроводной станции. Предложено математическую формализацию проблемы а также алгоритм оптимализации графиков.

THE PRODUCTION SCHEDULING PROBLEM IN THE WATER TREATMENT PLANT WITH THE CONTACT FILTERS**S u m m a r y**

The paper deals with a the production scheduling problem in the water treatment plant. A mathematical formulation of this problem and algorithm for the optimization of scheduling is presented.