ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988
Seria:AUTOMATYKA z.95 Nr kol.971

Zdzisław Hejducki, Juliusz Mrozowicz
Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

ZAGADNIENIE SYNCHRONIZACJI KOMPLEKSÓW ROBÓT BUDOWLANYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono algorytm synchronizacji kompleksów robót budowlanych z wykorzystaniem potokowych metod organizacji. Zagadnienie to pojawia się dość często w praktyce budowlanej, podczas realizacji robót montażowych, w których bierze udział czynnik limitujący proces wznoszenia obiektów, np. żuraw wieżowy. Przedstawiony algorytm zapewnia synchronizację kompleksów robót budowlanych, przy ich wzajemnej organizacyjnej zależności.

1. Wstęp

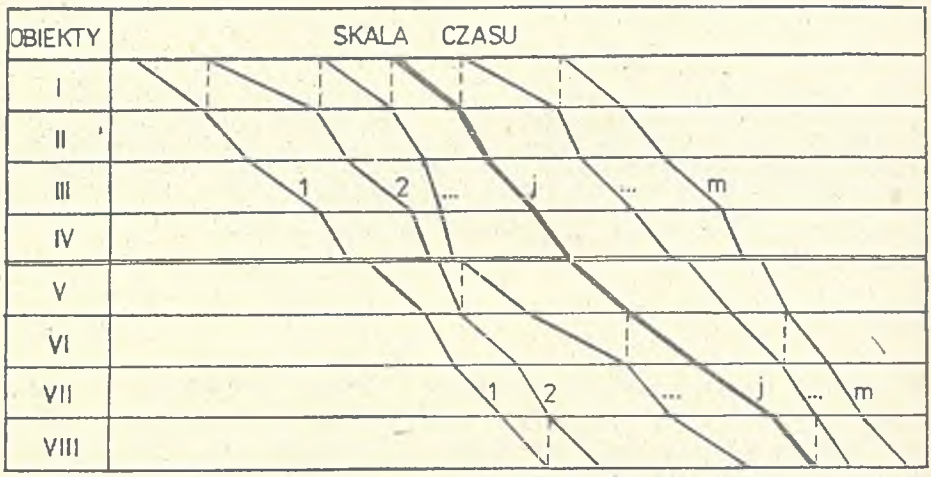
Referat ten stanowi kontynuację tematyki przedstawionej na V Krajowej Konferencji Automatyzacji Dyskretnych Procesów Przemysłowych. Przedstawiono wyniki kolejnego etapu prac nad zagadnieniami harmonogramowania realizacji kompleksu robót budowlanych. Powstał on przy współpracy z Katedrą Organizacji, Planowania i Zarządzania Budownictwem Leningradzkiego Instytutu Inżynieryjno-Budowlanego w dziedzinie zastosowania potokowych metod organizacji do planowania realizacji obiektów budowlanych [1]. Podstawowe pojęcia i definicje przedstawione zostały w pracach [2, 3] oraz w artykule opublikowanym w materiałach konferencyjnych IVKK ADPP [4].

W procesie planowania realizacji kompleksu obiektów budowlanych pojawiają się problemy harmonizacji robót z uwzględnieniem szeregu ograniczeń technologicznych i organizacyjnych. Powszechnym ograniczeniem jest na przykład konieczność uwzględnienia ciągłości pracy maszyny wiodącej /np. żurawia wieżowego/, mającym wpływ na potokowy charakter procesów budowlanych. Modelując potok o strukturze równoległej możemy wyróżnić następujące przypadki:
- zagadnienie modelowania potoku z zachowaniem ciągłości procesów wiodących,
- zagadnienie synchronizacji przy wzajemnej organizacji zależności potoków.

Pierwszy z wymienionych problemów opracowany został w pracy [3]. Natomiast drugi stanowi treść niniejszego artykułu.

Zagadnienie to pojawiło się podczas planowania realizacji kompleksu obiektów budownictwa przemysłowego. Trzy zespoły obiektów realizowane były z udziałem dwóch żurawi wieżowych, poruszających się po jednym torowisku. Dwa obiekty powinny być realizowane równolegle, przy czym zakończenie drugiego powinno nastąpić w ściśle określonym momencie, uzależnionym od wykonania robót montażowych na pierwszym obiekcie /rys. 2/. Wynikało to z ko-

nieczności przejazdu żurawia wieżowego z drugiego obiektu do trzeciego zespołu obiektów. Problem ten pojawił się na skutek ograniczonej wielkości miejsca realizacji robót /zakład w ruchu/, tj. możliwości usytuowania jednego torowiska, oraz dostępności środków /przedsiębiorstwo dysponuje dwoma żurawiami wieżowymi/.



Rys. 1. Potok o strukturze równoległej z zachowaniem ciągłości procesów wiodących /oznaczenia w tekście/
Fig. 1. Parallel - strukture flow with the principal processes continuity /denotation in the text/

Rys. 2. Potok o strukturze równoległej z uwzględnieniem wzajemnej organizacyjnej zależności grup robót
Fig. 2. Parallel - structure flow with organisational interdependence of construction work groups

2. Ogólne sformułowanie problemu

Zagadnienie synchronizacji potoków przy ich organizacyjnej zależności polega na określeniu takiego przydziału brygad roboczych wraz z ich technicznym wyposażeniem, aby zminimalizować łączny czas wykonania kompleksu przy spełnieniu ograniczeń:

/I/ każdy proces może być realizowany przez specjalizowaną brygadę,

/II/ na froncie roboczym nie może być wykonywany jednocześnie więcej niż jeden proces,

/III/ muszą być spełnione ograniczenia zasobowe.

Szczegółowo, należy znaleźć wartości zmiennych:

$$t_z,\ t_j^x,\ t_j^y,\quad j = N_k \quad \text{oraz} \quad u_j^k,\quad j \in N_k \qquad /1/$$

które minimalizują funkcję celu $t_z \to \min$,

gdzie:

t_z - czas zakończenia wszystkich robót,

t_j^x - czas rozpoczęcia j-tej roboty, $j \in M$,

t_j^y - czas zakończenia j-tej roboty, $j \in M$,

c_j - czas wykonania j-tej roboty, $c_j > 0$,

u_j^k - ilość zasobów /liczba brygad roboczych/ przydzielona do wykonania roboty j,

Istnieją ograniczenia:

$$t_j^y - t_j^x \geqslant \sum c_j \qquad /2/$$

$$t_j^x \geqslant t_i^y \qquad /3/$$

$$t_j^x \geqslant t_o \qquad /4/$$

t_o - czas rozpoczęcia robót /$t_o = 0$/

$$t_z \geqslant t_i^y,\quad i \in N \qquad /5/$$

$$t_o,\ t_z,\ t_j^x,\ t_j^y \geqslant 0,\quad j \in N \qquad /6/$$

$$Cj_w = f_j^k(u_j^k),\quad j \in N_k \qquad /7/$$

f_j^k - funkcja ilości środków

$$\alpha_j^k \leqslant u_j^k \leqslant \beta_j^k,\quad j = N_k,\quad k \in Q_1 \qquad /8/$$

Chcąc wykonać określony proces, należy posiadać brygadę składającą się z α_j^k pracowników, nie więcej jednak niż β_j^k.

Ponadto należy tak dobrać ilość środków realizacji w modelowanym równoległym potoku P_{k+1}, aby kompleks robót wykonać w zadanym terminie $T_{k+1} \leqslant T_k$

gdzie:

T_{k+1} - termin wykonania kompleksu robót w równoległym potoku k+1,
T_k - termin wykonania grupy robót potoku k.

3. Schemat rozwiązania zagadnienia

Jest to problem dotyczący sterowania procesem realizacji obiektów budowlanych. Racjonalne sterowanie polega na określeniu terminów rozpoczęcia t_j^x oraz zakończenia t_j^y robót. Wielkością sterującą jest wektor, którego składowe określają czasy trwania robót c_{jw}, kolejność ich wykonania, przydział brygad roboczych u_j^k. Racjonalne sterowanie w omawianym przypadku będzie miało charakter zamknięty, bowiem dotyczyć będzie modelowania kompleksu robót przed momentem ich rozpoczęcia. Polegało będzie ono na doborze środków realizacji /brygad z ich wyposażeniem/ i zadań, aby zrealizować kompleks obiektów potoku P_{k+1} w uzależnieniu od terminu realizacji częściowego potoku z kompleksu P_k.

Procedura sterowania procesem realizacji może mieć następujący przebieg /w ogólnym zarysie/.

Krok 1

Sprawdzenie, czy czas wykonania kompleksu t_z^{k+1} odpowiada planowanemu t_j^k, dla zadanych ograniczeń. Jeżeli $t_z^{k+1} \leqslant t_z^k$, to przejść do kroku 4.

Krok 2

Ustalić wektor sterowania uwzględniający nowe warunki realizacji robót /czasy trwania pozostałych robót/, dodatkowe niezbędne środki realizacji.

Krok 3

Realizacja algorytmów optymalizacyjnych modelowania minimalno-czasowego potoków i sprawdzenie warunku ich zależności równoległej, tj. czy $t_z^{k+1} \leqslant t_{zj}^k$.

Krok 4

Opracować charakterystyki czasowe modelowanego potoku.

Krok 5

Zakończyć proces sterowania.

Jest to problem optymalizacji dyskretnej, polegający na utworzeniu zbioru sterowań dopuszczalnych. Wynikają one z wielkości zbioru zasobów u. Tworzony jest więc zbiór modeli realizowanych kompleksu, poprzez zmianę elementów wektora sterowania.

$$\bigwedge_{j \in M} \bigwedge_{i \in M} \left[x_{ij}(t) = f\left[u_{ij}^1(t), u_{ij}^2(t), \ldots, u_{ij}^q(t)\right]\right] \qquad /9/$$

gdzie:

$X_{ij}(t)$ - stan j-tej roboty na i-tym obiekcie w momencie t,

$U_{ij}(t)$ - ilość środków realizacji przydzielona do wykonania roboty j na obiekcie i.

Rozwiązanie przedstawionego zagadnienia jest dość złożone z uwagi na to, że należy każdorazowo dokonać harmonizacji potoku, tzn. uwzględnić występujące ograniczenia technologiczne i organizacyjne, zachowując przy tym jego strukturę.

Algorytm harmonizacji potoku.

Krok 1

Dokonać harmonizacji potoku P_k, ustalając racjonalną kolejność realizacji obiektów i metodę organizacji robót.

Krok 2

Wyznaczyć terminy t_j^x rozpoczęcia robót pierwszego częściowego potoku P_k.

Krok 3

Dokonać harmonizacji potoku P_{k+1}, ustalając racjonalną kolejność realizacji obiektów oraz metodę organizacji robót.

Krok 4

Sprawdzić, czy $t_{k+1}^y \leqslant t_k^y$, jeżeli nie, to przejść do kroku 5, jeżeli tak, to przejść do kroku 7.

Krok 5

Dokonać korekty elementów macierzy wejściowej zwiększając ilość środków realizacji /brygad roboczych/, skracając czasy wykonania poszczególnych robót na obiektach.

Krok 6

Sprawdzić warunek, wg zależności analizowanej w kroku 4.

Krok 7

Wyznaczyć charakterystyki czasowe złożonych potoków.

Harmonizowanie równoległych potoków, z uwzględnieniem przyjętych ograniczeń, wymaga szeregu iteracji pozwalających znaleźć poszukiwane rozwiązanie. Dobór środków odbywa się w sposób dyskretny, bowiem funkcja rozdziału jest nieciągła, skokowa.

W praktyce pozwala to na całkowite zbadanie zbioru sterowań. W zasadzie o efekcie decyduje ilość środków zgromadzonych na drodze krytycznej, tzn. znaleźć min t_z, przy ograniczeniach:

gdzie:

T_{k+1} - termin wykonania kompleksu robót w równoległym potoku k+1,
T_k - termin wykonania grupy robót potoku k.

3. Schemat rozwiązania zagadnienia

Jest to problem dotyczący sterowania procesem realizacji obiektów budowlanych. Racjonalne sterowanie polega na określeniu terminów rozpoczęcia t_j^x oraz zakończenia t_j^y robót. Wielkością sterującą jest wektor, którego składowe określają czasy trwania robót c_{jw}, kolejność ich wykonania, przydział brygad roboczych u_j^k. Racjonalne sterowanie w omawianym przypadku będzie miało charakter zamknięty, bowiem dotyczyć będzie modelowania kompleksu robót przed momentem ich rozpoczęcia. Polegało będzie ono na doborze środków realizacji /brygad z ich wyposażeniem/ i zadań, aby zrealizować kompleks obiektów potoku P_{k+1} w uzależnieniu od terminu realizacji częściowego potoku z kompleksu P_k.

Procedura sterowania procesem realizacji może mieć następujący przebieg /w ogólnym zarysie/.

Krok 1

Sprawdzenie, czy czas wykonania kompleksu t_z^{k+1} odpowiada planowanemu t_j^k, dla zadanych ograniczeń. Jeżeli $t_z^{k+1} \leqslant t_z^k$, to przejść do kroku 4

Krok 2

Ustalić wektor sterowania uwzględniający nowe warunki realizacji robót /czasy trwania pozostałych robót/, dodatkowe niezbędne środki realizacji.

Krok 3

Realizacja algorytmów optymalizacyjnych modelowania minimalno-czasowego potoków i sprawdzenie warunku ich zależności równoległej, tj. czy $t_z^{k+1} \leqslant t_{zj}^k$.

Krok 4

Opracować charakterystyki czasowe modelowanego potoku.

Krok 5

Zakończyć proces sterowania.

Jest to problem optymalizacji dyskretnej, polegający na utworzeniu zbioru sterowań dopuszczalnych. Wynikają one z wielkości zbioru zasobów u. Tworzony jest więc zbiór modeli realizowanych kompleksu, poprzez zmianę elementów wektora sterowania.

$$\bigwedge_{j \in M} \bigwedge_{i \in M} \left[x_{ij}(t) = f\left[u_{ij}^1(t), u_{ij}^2(t), \ldots, u_{ij}^q(t)\right]\right] \qquad /9/$$

gdzie:

$X_{ij}(t)$ - stan j-tej roboty na i-tym obiekcie w momencie t,

$U_{ij}(t)$ - ilość środków realizacji przydzielona do wykonania roboty j na obiekcie i.

Rozwiązanie przedstawionego zagadnienia jest dość złożone z uwagi na to, że należy każdorazowo dokonać harmonizacji potoku, tzn. uwzględnić występujące ograniczenia technologiczne i organizacyjne, zachowując przy tym jego strukturę.

Algorytm harmonizacji potoku.

Krok 1

Dokonać harmonizacji potoku P_k, ustalając racjonalną kolejność realizacji obiektów i metodę organizacji robót.

Krok 2

Wyznaczyć terminy t_j^x rozpoczęcia robót pierwszego częściowego potoku P_k.

Krok 3

Dokonać harmonizacji potoku P_{k+1}, ustalając racjonalną kolejność realizacji obiektów oraz metodę organizacji robót.

Krok 4

Sprawdzić, czy $t_{k+1}^y \leqslant t_k^y$, jeżeli nie, to przejść do kroku 5, jeżeli tak, to przejść do kroku 7.

Krok 5

Dokonać korekty elementów macierzy wejściowej zwiększając ilość środków realizacji /brygad roboczych/, skracając czasy wykonania poszczególnych robót na obiektach.

Krok 6

Sprawdzić warunek, wg zależności analizowanej w kroku 4.

Krok 7

Wyznaczyć charakterystyki czasowe złożonych potoków.

Harmonizowanie równoległych potoków, z uwzględnieniem przyjętych ograniczeń, wymaga szeregu iteracji pozwalających znaleźć poszukiwane rozwiązanie. Dobór środków odbywa się w sposób dyskretny, bowiem funkcja rozdziału jest nieciągła, skokowa.

W praktyce pozwala to na całkowite zbadanie zbioru sterowań. W zasadzie o efekcie decyduje ilość środków zgromadzonych na drodze krytycznej, tzn. znaleźć min t_z, przy ograniczeniach:

$$\sum Y_j(1)\, f_j(U_j) \leqslant t_z \qquad /10/$$

$$\sum U_j \leqslant U^k \qquad /11/$$

$$-t_g \geqslant 0 \qquad /12/$$

gdzie:

Y_j - zmienna binarna

$$Y_j = \begin{cases} 1 - \text{gdy łuk o obciążeniu } C_j,\ j=1,2,\ldots,m, \\ 0 - \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases} \qquad /13/$$

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono algorytm synchronizacji potoków przy ich wzajemnej organizacyjnej zależności. Zagadnienie to pojawia się dość często w praktyce budowlanej, podczas realizacji robót montażowych, w których bierze udział limitujący czynnik, np. żuraw wieżowy.

W praktyce budowlanej sterowanie procesem realizacji kompleksu obiektów odbywa się najczęściej intuicyjnie. Planowanie racjonalnego przebiegu robót dla wielkiego zespołu obiektów metodami heurystycznymi, z uwagi na ogromną liczbę danych potrzebnych informacji, jest nieskuteczne. Z reguły przyjmowane jest do realizacji jakiekolwiek realne rozwiązanie, nie zawsze wobec tego optymalne. Przedstawiony sposób harmonogramowania kompleksu robót budowlanych zapewnia racjonalne planowanie przebiegu robót przy przyjętych ograniczeniach.

Problem ten pojawił się podczas opracowywania projektu organizacji budowy kompleksu obiektów przemysłowych Nadodrzańskich Zakładów Przemysłu Tłuszczowego w Brzegu. Do jego rozwiązania opracowano program na komputer IBM PC/XT, w języku TURBO PASCAL. Ustalenie racjonalnej kolejności realizacji obiektów z wykorzystaniem metody podziału i ograniczeń [5] oraz metody organizacji robót odbywa się z zastosowaniem programów optymalizacyjnych OPTY, zapewniających harmonizację robót w każdym potoku.

LITERATURA

[1] Afanasev V. A. Hejducki Z., Mrozowicz J., Metoda potokowej organizacji robót z krytycznymi robotami wyznaczonymi przy uwzględnieniu sprzężeń diagonalnych i odwrotnych diagonalnych, XXVI KN KILiW PAN i KN PZITB Wrocław, Krynica 1980.

[2] Mrozowicz J. Potokowe metody organizacji procesów budowlanych, Monografia 14. WPW, Wrocław 1982.

[3] Hejducki Z. Próba zastosowania potokowych metod organizacji do planowania realizacji wielkich kompleksów budowlanych, rozprawa doktorska,

Raporty Instytutu Budownictwa PWr, seria PRE 5/86, Wrocław 1986.

[4] Hejducki Z. Mrozowicz J. Ustalenie kolejności w zbiorze potoków obejmujących kompleks obiektów budowlanych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Automatyka z. 85, Gliwice 1986, s. 85-93.

[5] Grabowski J., Uogólnione zagadnienie optymalizacji kolejności operacji w dyskretnych systemach produkcyjnych. Monografia nr 9, WPWr. Wrocław 1979.

Recenzent: Prof.dr inż.H.Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 1988-04-30.

ВОПРОСЫ СИНХРОНИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Р е з ю м е

В работе изложен алгоритм синхронизации строительных работ с применением поточных методов организации. Вопрос этот имеет место на строительном производстве , особенно когда появляется технологическое ограничение, на пример строительный кран.

SYNCHRONIZATION OF CONSTRUCTION WORK

S u m m a r y

The algorithm of construction work synchronisation by means of the flow-organization method is presented.
The problem is especially important during assembly of building structures, while a crane is the lime - limitating factor. The algorithm allows to realize the synchronization above in such a way that all groups of construction work keep their organizational interpendence.