ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: AUTOMATYKA z. 56 Nr kol. 652

Wojciech Borucki
Akademia Ekonomiczna w Poznaniu
Andrzej Borucki
Politechnika Poznańska

STEROWANIE TRANSPORTEM DOSTAW W SYSTEMIE MONTAŻU STACJONARNEGO Z MOŻLIWOŚCIĄ POŚREDNIEGO SKŁADOWANIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono próbę usprawnienia systemu sterowania transportem dostaw w systemie montażu stacjonarnego z możliwością pośredniego składowania. Rozpatrzono to na przykładzie systemu transportu prefabrykatów z "fabryk domów" na place budowy. Do tego celu zastosowano dyskretne zadanie optymalizacyjne. Heurystyczna metoda rozwiązywania zadania polega na rozwiązaniu dwóch zadań częściowych, z których pierwsze dotyczy kompletacji dostaw prefabrykatów, drugie harmonogramowania dostaw na place budowy. Przedstawiona metoda może również znaleźć zastosowanie przy sterowaniu transportem dostaw dla montażu wielkogabarytowych maszyn i urządzeń.

1. Wstęp

W prezentowanym niżej artykule przedstawione zostanie zadanie decyzyjne dotyczące ustalenia kompletów i harmonogramu wysyłki prefabrykatów budowlanych z punktów załadowania na place budowy. Jest to jeden z możliwych wariantów zadań, jakie powstają po przyjęciu różnych założeń dotyczących sposobów organizacji montażu oraz kompletacji dostaw. Głównymi założeniami, jakie się dalej przyjmuje, są założenia o ciągłości montażu oraz o możliwości prowadzenia montażu w części z kół, w części zaś z pośrednim składowaniem. Pośrednie składowanie prefabrykatów na składowiskach przyobiektowych jest z wielu punktów widzenia zjawiskiem niekorzystnym[1]. Dlatego kompletacja i harmonogramowanie dostaw powinno być tak prowadzone, by zminimalizować liczbę składowanych prefabrykatów, okres ich oczekiwania na montaż i jednocześnie zminimalizować liczbę środków transportowych użytych do przewozu kompletów.

Zadanie, które prezentujemy, nie należy do zadań, dla których łatwo można znaleźć rozwiązanie optymalne. Należy ono do klasy nieliniowych zadań programowania dyskretnego[2], tzw. klasy zadań mieszanych, w których część zmiennych to ciągłe zmienne rzeczywiste, a pozostałe to zmienne

---

1) patrz uwagi w [6]
2) por. np [5]

binarne (przyjmujące wartości 0 lub 1).

Trudność podania reguł prowadzących do otrzymania rozwiązania optymalnego skłoniła autorów do podania reguł postępowania dla otrzymania "dobrego" (suboptymalnego) rozwiązania dopuszczalnego, poprzez rozwiązanie ciągu zadań częściowych.

2. Podstawowe założenia

Przyjmować będziemy następujące założenia o organizacji i technologii prac transportowo-montażowych:

1. Danych jest n placów budowy i na każdym placu budowy należy zamontować m_i prefabrykatów budowlanych.
2. Montaż prowadzi się w sposób ciągły, tzn. po zamontowaniu jednego elementu prefabrykowanego przechodzi się natychmiast do montażu elementu następnego.
3. Montaż prefabrykatów uporządkowany jest liniowo, tzn. że dla $j = 1,2,\ldots m_i-1$, j-ty prefabrykat montowany jest przed j+1-szym.
4. Dostawy prefabrykatów nadchodzą na place budowy w takich terminach, że podczas całego okresu montażu obiektu potrzebny w danej chwili element znajduje się na placu budowy albo na środku transportowym, albo na składowisku przyobiektowym.
5. Komplety mogą być montowane w całości z kół, o ile zawierają prefabrykaty montowane kolejno po sobie, a w przeciwnym przypadku prefabrykaty nie należące do sekwencji aktualnie montowanej składowane są na składowisku przyobiektowym i stamtąd w razie potrzeby wybierane są do montażu.
6. Place budowy wyposażone są w dwa różne urządzenia (pracujące niezależnie od siebie), z których jedno służy do montażu, a drugie do rozładunku elementów na składowisko.
7. Środki transportu używane do przewozu prefabrykatów są jednorodne i zakładamy, że liczba ich jest wystarczająca do zrealizowania zadań przewozowych.
8. Prefabrykaty przewożone są na place budowy w kompletach tak ustalonych, że nie przekraczają pojemności środków transportowych.
9. W zbiorach prefabrykatów przeznaczonych dla każdej budowy wyróżnić można (niekoniecznie rozłączne) podzbiory prefabrykatów, które ze względu na możliwe dla nich sposoby transportu oraz gabaryty mogą być przewożone razem. Nie mogą być przewożone razem prefabrykaty nie należące do tego samego podzbioru.

10. W punkcie załadowania danych jest r stanowisk załadowania, na których w danej chwili załadunek jednego kompletu prefabrykatów wyklucza załadunek innego. Do prac załadunkowych przy następnym komplecie przejść można po ukończeniu załadunku kompletu aktualnie załadowywanego.

3. Zadanie decyzyjne

Zanim przejdziemy do formalizacji przyjętych założeń przedstawimy listę używanych oznaczeń:

Przyjmiemy następujące oznaczenia:

n - liczba montowanych obiektów

m_i - liczba prefabrykatów do zamontowania na i-tej budowie

l_i^* - maksymalna liczba kompletów możliwych do utworzenia

P_i - zbiór prefabrykatów dla i-tej budowy

P_i^k - k-ty podzbiór prefabrykatów, które mogą być przewożone razem

d_{ij} - wskaźnik wykorzystania pojemności środka transportowego przez j-ty prefabrykat dla i-tej budowy

τ_{ij} - czas załadunku j-tego prefabrykatu dla i-tej budowy

t_{ij} - czas montażu j-tego prefabrykatu dla i-tej budowy

w_{ij} - czas zładowania ij-tego pref.na składowisko przyobiektowe

t_i - czas dojazdu z punktu załadowania na i-tej plac budowy

x_{io} - moment rozpoczęcia montażu na i-tej budowie

x_{ij} - moment ukończenia montażu j-tego elementu na i-tej budowie

y_{il} - moment wysyłki l-tego kompletu prefabrykatów na i-tą budowę

ξ_{ij}^l - zmienna zero-jedynkowa przyjmująca wartość 1 w przypadku, gdy j-ty element przeznaczony dla i-tej budowy należy do l-tego kompletu, a zero w przeciwnym przypadku

K_{il} - zbiór prefabrykatów tworzących l-ty komplet dla i-tej budowy

S_{il} - zbiór numerów prefabrykatów tworzących sekwencję prefabrykatów z l-tego kompletu montowanych kolejno po sobie. Do sekwencji należy element o najmniejszym numerze w komplecie

$\bar{S}_{il}$ - zbiór numerów prefabrykatów z l-tego kompletu nie należących do sekwencji

M_{il} - największy numer prefabrykatu w sekwencji

N_{il} - najmniejszy numer prefabrykatu w sekwencji

δ_{ij}^l - zmienna zero-jedynkowa przyjmująca wartość jeden, gdy (ij)-ty element należy do sekwencji z l-tego kompletu

z_{ij}^l - moment ukończenia montażu sekwencji prefabrykatów z l-tego kompletu

a_{il} – czas załadunku l-tego kompletu dla i-tej budowy
b_{il} – czas montażu sekwencji prefabrykatów z l-tego kompletu
c_{il} – czas zładowania prefabrykatów z l-tego kompletu nie należących do sekwencji
ν_{il}^{l} – zmienna zero-jedynkowa przyjmująca wartość jeden, gdy l-ty komplet dla i-tej budowy został utworzony i zero w przeciwnym przypadku
γ_{il}^{k} – zmienna zero-jedynkowa przyjmująca wartość jeden, gdy l-ty komplet dla i-tej budowy załadowywany jest na k-tym stanowisku załadunkowym, a zero w przeciwnym przypadku.

Pomiędzy poszczególnymi zmiennymi i parametrami zachodzą następujące związki:

(1) $$x_{ij} = x_{ij-1} + t_{ij} \qquad i=1,\dots n;\ j=1,\dots m_i$$

(2) $$K_{il} = \{ j : \xi_{ij}^{l} = 1 \} \qquad i=1,\dots n;\ j=1,\dots m_i;\ l=1,\dots l_i^*$$

(3) $$N_{il} = \min_{j:\ \xi_{ij}^{l}=1} j$$

(4) $$S_{il} = \{ j : \forall (N_{il} \leqslant k \leqslant j)\ \xi_{ik}^{l} = 1 \}$$

(5) $$\delta_{iN_{il}} = 1$$

(6) $$\delta_{ij}^{l} = \delta_{ij-1}^{l}\, \xi_{ij}^{l}$$

(7) $$z_{il} = \max_{j=1,\dots m_i} \delta_{ij}^{l} x_{ij}$$

(8) $$a_{il} = \sum_{j=1}^{m_i} \xi_{ij}^{l} \tau_{ij}$$

(9) $$b_{il} = \sum_{j=1}^{m_i} \delta_{ij}^{l} t_{ij}$$

(10) $$\bar{S}_{il} = K_{il} - S_{il}$$

(11) $$c_{il} = \sum_{j=1}^{m_i} \xi_{ij}^{l} (1-\delta_{ij}^{l})\, \omega_{ij} = \sum_{(ij)\in \bar{S}_{il}} \omega_{ij}$$

(12) $$\nu_{il} = \operatorname{sign} \sum_{j=1}^{m_i} \xi_{ij}^{l}$$

Dopuszczalny skład i harmonogram dostaw wyrażony wartościami zmiennych δ_{ij}^{l}, ξ_{ij}^{l}, γ_{ij}^{l} oraz z_{il} i y_{il} prócz warunków (1) ÷ (11) spełniać musi również dodatkowe warunki odpowiadające przyjętym wcześniej założeniom.

Warunki te są następujące:

$$\sum_{l=1}^{l_i} \xi_{ij}^{l} = 1 \qquad \forall_{i,j} \tag{13}$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} \xi_{ij}^{l} d_{ij} \leq 1 \qquad \forall_{i,l} \tag{14}$$

$$\forall_{k} \left(j_1 \notin P_i^{k} \vee j_2 \notin P_i^{k} \right) \Rightarrow \xi_{ij_1}^{l} \cdot \xi_{ij_2}^{l} = 0 \tag{15}$$

$$y_{il} + t_i \leq z_{il} - b_{il} \tag{16}$$

$$\sum_{k=1}^{r} \gamma_{il}^{k} = 1 \tag{17}$$

$$(\gamma_{il}^{k} \cdot \gamma_{pq}^{k})(y_{il} - a_{il}) \geqslant (\gamma_{il}^{k} \cdot \gamma_{pq}^{k}) \cdot y_{pq} \qquad \text{albo} \tag{18}$$

$$(\gamma_{il}^{k} \cdot \gamma_{pq}^{k})(y_{pq} - a_{pq}) \geqslant (\gamma_{il}^{k} \cdot \gamma_{pq}^{k}) \cdot y_{il}$$

Interpretacja tych warunków jest następująca:

Warunek (13) zapewnia, że każdy element wchodzić będzie w skład odpowiedniego kompletu. Warunek (14), że dla każdego kompletu pojemność środka transportowego nie zostanie przekroczona. Nie wejdą też w skład kompletu elementy nie należące do jednego podzbioru elementów, które mogą być przewożone razem (war.15).

Warunek (16) zapewnia, że komplet dostarczony będzie przed momentem rozpoczęcia montażu sekwencji elementów należących do tego kompletu. Każdy komplet załadowany zostanie na jednym ze stanowisk załadowania (war.17) i prace załadunkowe przy różnych kompletach prowadzone na tym samym stanowisku załadowania prowadzone będą w rozłącznych okresach czasu (war.18). Optymalny skład i harmonogram dostaw powinien minimalizować pewien funkcjonał mierzący jednocześnie efektywność wykorzystania środków transportowych i okresy czasu oczekiwania prefabrykatów na montaż.

Funkcjonałem takim jest:

$$V = \sum_{il} \left[\sum_{j=1}^{m_i} \left\{ \xi_{ij}^{l} \tau_{ij} + \delta_{ij} t_{ij} + (1 - \delta_{ij}^{l}) \xi_{ij}^{l} w_{ij} \right\} + 2 t_i \nu_i^{l} \right] + \tag{19}$$

$$+ \sum (z_{il} - b_{il} - y_{il} - t_i) + \sum_{l} \sum_{ij} (\xi_{ij}^{l} x_{ij} - y_{il} - t_i)$$

Pierwszy człon tego funkcjonału mierzy czas pracy przewozowej środków transportowych, drugi czas oczekiwania na placu budowy na montaż i rozładunek, a trzeci czas oczekiwania elementów na montaż.

Skomplikowana postać warunków zadania i funkcji celu skłoniła nas do zaproponowania procedury rozwiązywania zadania opartej na rozwiązaniu zadań częściowych.

Pierwsze z tych zadań polegać będzie na ustaleniu takich kompletów dla każdej budowy, że:

1° minimalna jest ich liczba, a więc środki transportowe wykorzystane są w możliwie maksymalny sposób,

2° komplety zawierają elementy, dla których okresy ich montażu są minimalnie od siebie oddalone.

Drugie zadanie polega na wyznaczeniu harmonogramu dostaw minimalizującego czas oczekiwania środków transportowych na placu budowy na montaż sekwencji prefabrykatów i na rozładunek.

4. Zadania częściowe

A. Pierwsze z zadań, dotyczące kompletacji, przedstawimy jako zadanie programowania binarnego z dwoma, hierarhicznie uporządkowanymi funkcjami celu.

Dla zlinearyzowania warunku (15) wprowadzimy macierz $P_i = \left[d_{ij}^k\right]$ określoną w sposób następujący:

$$d_{ij}^k = \begin{cases} d_{ij} & \text{dla} \quad j \in P_i^k \\ C & \text{dla} \quad j \notin P_i^k \end{cases} \tag{20}$$

przy czym $C > 1$.

Rozpatrywane zadania kompletacji (osobno dla każdej budowy) mieć będą postać:

$$\sum_{l=1}^{l^*} \nu_i^l = \min \tag{21}$$

$$\sum_{l=1}^{l^*} u_i^l = \min \tag{22}$$

przy warunkach

$$\sum_{l=1}^{l^*} \xi_{ij}^l = 1 \tag{23}$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} \xi_{ij}^l d_{ij}^k \leq \nu_i^l \tag{24}$$

$$(25) \quad \xi^l_{ij_1} \cdot \xi^l_{ij_2} (x_{ij_1} - x_{ij_2}) \leq u^l_i$$

$$(26) \quad \xi^l_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad v_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad u^l_i \geqslant 0$$

Zadanie to należy do klasy zadań o rozbiciu, dla których metody rozwiązywania znaleźć można na przykład w pracach [3], [4], [7].

B. Drugie zadanie częściowe, jakie proponujemy rozwiązać, dotyczy harmonogramowania dostaw.

Dla wyznaczenia parametrów występujących w tym zadaniu niezbędne jest wcześniejsze rozwiązanie zadania kompletacji i wyliczenia tychże parametrów w oparciu o wzory podane w punkcie trzecim niniejszej pracy. Zadanie to ma postać:

$$(27) \quad \sum_{il} (z_{il} - b_{il} - y_{il} - t_i) = \min$$

przy warunkach:

$$(28) \quad y_{il} + t_i \leq z_{il} - b_{il}$$

$$(29) \quad \sum_{k=1}^{r} \gamma_{il} = 1$$

$$(30) \quad (\gamma^k_{il} \gamma^k_{pq})(y_{il} - a_{il}) \leq (\gamma^k_{il} \gamma^k_{pq}) y_{pq} \quad \text{albo}$$

$$(\gamma^k_{il} \gamma^k_{pq})(y_{pq} - a_{pq}) \leq (\gamma^k_{il} \gamma^k_{pq}) y_{il}$$

$$(31) \quad \gamma^k_{il} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

Parametrami wyliczonymi w oparciu o rozwiązanie zadań kompletacji są b_{il}, z_{il} oraz a_{il}, zaś w trakcie rozwiązywania zadania (27) - (31) należy wyznaczyć wartości zmiennych γ_{il} oraz y_{il}. Heurystyczny algorytm rozwiązywania tego zadania zawarty jest w [1]. Jego zmodyfikowana wersja, uzupełniona o iteracyjną procedurę poprawienia rozwiązania, oprogramowana została na maszynę ODRA 1305[3].

---

3) por. [2]

5. Uwagi końcowe

1. Warunkiem wdrożenia przedstawionej metody sterowania transportem prefabrykatów na place budowy jest rzetelne oszacowanie ocen odpowiednich parametrów odpowiadających czasom trwania poszczególnych czynności (czasy załadunku, montażu, objazdów).
2. Zakłócenia występujące w toku realizacji procesu montażu zmieniające harmonogram montażu zmuszać będą do aktualizacji rozwiązań zadania optymalizacyjnego.
3. Proponowana metoda sterowania transportem dostaw wymaga od wykonawców zachowania zaprojektowanych reżimów pracy odpowiednich ciągów technologicznych realizujących procesy montażowe i transportowe.

LITERATURA

[1] Borucki W. : Optymalizacja transportu prefabrykatów budowlanych z wielu stanowisk załadowania, referat na konferencję KSiE PAN, Konin 1976.

[2] Borucki W., Kasprzyk A. : Opis programu OTP3, maszynopis AE. Poznań 1979.

[3] Bukietyński W. : Niektóre zagadnienia optymalizacji dyskretnej ZN. AE we Wrocławiu, Wrocław 1975.

[4] Garfinkel R.S, Nemhauser G.L : Programowanie całkowito-liczbowe, PWN, Warszawa 1978

[5] Korbut A.A., Finkelsztejn J.J. : Programowanie dyskretne, PWN, Warszawa 1974.

[6] Praca zbiorowa. Projekt organizacji produkcji i montażu obiektów w systemie W-70 w woj.zielonogórskim. Część C - Transport elementów - Poznań 1972.

[7] Praca zbiorowa. Travaux du Groupe AFCET: Programmation Combinatoire, Paris 2.06.1977.

УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТОМ ПОСТОВОК В СИСТЕМЕ СО СТАЦИОНАРНЫМ РЕЖИМОМ МОНТАЖА

Р е з ю м е

В статье рассмотривается нелинейная задача дискретного программирования связана с управлением транспортом поставок в системе со стацио-

нарным режимом монтажа допускающим косвенное хранение. Авторы предлагают некоторый эвристический метод решения задачи. Он находит сначала последовательность решений связанных с ним "локальных" задач, зачем устанавливает метод перехода от локальных решений к допустимому, субоптимальному решению исходной задачи.

DELIVERY CONTROL IN A SYSTEM OF STATIONARY MONTAGE

S u m m a r y

In the paper a method of delivery control in a system of stationary montage is presented. The method is based on the solution of a discrete optimization problem. The heuristic algorithm of solving this problem base on the decomposition of the primary problem into two smaler ones.