

Zdzisław HEJDUCKI, Juliusz MROZOWICZ
Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

HARMONOGRAMOWANIE ROBÓT BUDOWLANYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY RÓWNOLEGŁO – POTOKOWEJ

Streszczenie. W referacie przedstawiono algorytm harmonogramowania robót budowlanych z uwzględnieniem metody równoległo-potokowej. Zaproponowano sposób planowania pracy wielu grup roboczych jednej specjalności, uwzględniając typowe w budownictwie ograniczenia technologiczne i organizacyjne.

SCHEDULING OF SITE WORK COMPLEX WITH PARALLEL-STREAM METHOD APPLICATION

Summary. Parallel-stream methods are more developed forms a classic stream methods. They are designed for planning the progress of site works. New methods of work organizing are described. They allow to synchronize progress of works taking into account standards technological conditions. A minimum-time criterion of optimization is considered.

1. Wstęp

Kontynuując tematykę prezentowaną na konferencjach ADPP w latach 1992 i 1994 roku, przedstawiony zostanie w niniejszej pracy algorytm harmonogramowania robót budowlanych z uwzględnieniem metody równoległo-potokowej. W organizacji budownictwa stosowane są między innymi potokowe metody organizacji robót, wśród których wyróżnić można grupę metod równoległo – potokowych:

- 1) metodę z ciągłym wykorzystaniem środków realizacji [1],
- 2) metodę z ciągłym prowadzeniem robót na frontach roboczych [2],
- 3) metodę z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi ,
- 4) metodę z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i sprzężeń diagonalnych,
- 5) metodę z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji, frontami roboczymi i odwrotnych sprzężeń diagonalnych.

* metoda omawiana w artykule

Metody równoległo-potokowe są rozwinięciem podstawowych metod potokowej organizacji [5], stosowanych w budownictwie do planowania przebiegu robót budowlanych. Uwzględniając występujące w praktyce wykonawczej ograniczenia technologiczne i organizacyjne, opracowano nowe narzędzia harmonogramowania robót budowlanych, zapewniające ich synchronizację oraz ustalenie kolejności wykonywania z zastosowaniem minimalno-czasowego kryterium optymalizacji.

Podstawowe pojęcia, definicje oraz niektóre zagadnienia dotyczące omawianej problematyki przedstawiono między innymi w [1,2,3,4,5].

2. Metoda z równoczesnym uwzględnieniem sprzężeń między środkami realizacji i frontami roboczymi

W metodzie tej jako podstawowe założenie przyjęto, że grupy robocze wraz z ich technicznym wyposażeniem przechodzą z obiektu budowlanego na obiekt (front, działkę) natychmiast, gdy zostanie on udostępniony przez inne grupy robocze. Może to powodować przerwy w planowaniu pracy grup roboczych lub przestoje frontów. Jednakże dostępność obu tych czynników (grup roboczych i frontów robót) umożliwia ich natychmiastową realizację, tworząc drogę krytyczną.

Metoda równoległo-potokowa umożliwia wprowadzenie dodatkowych środków realizacji (grup roboczych), wykonujących zadania inwestycyjne o tej samej technologii. Tworzą się częściowe potoki (procesy technologiczne), w których grupy robocze (firmy wykonawcze) prowadzą roboty tego samego rodzaju równolegle na frontach roboczych.

Istotną cechą metody równoległo-potokowej jest możliwość występowania kilku dróg krytycznych (łańcuchów), następujących po sobie robót krytycznych.

Harmonogramowanie z wykorzystaniem przedstawionej metody organizacji robót budowlanych wymaga, w celu jego praktycznego zastosowania, wyznaczenia charakterystyk czasowych robót, tj. najwcześniejszych i najpóźniejszych terminów rozpoczęcia i zakończenia robót na frontach oraz ustalenia robót krytycznych. Oblicza się również wartości sprzężeń czasowych między środkami realizacji i frontami roboczymi.

Wyznaczenie parametrów czasowych:

- Najwcześniejszy termin rozpoczęcia pierwszej roboty na pierwszym froncie dla grupy roboczej o tej samej specjalności przyjmuje się równy zero;
- W pierwszym częściowym potoku lub w pierwszych potokach szczegółowych najwcześniejsze terminy rozpoczęcia kolejnych robót przyjmuje się równe najwcześniejszym terminom zakończenia robót na frontach poprzedzających;

- Najwcześniejsze terminy rozpoczęcia pierwszych robót w następnych częściowych potokach wyznacza się przyjmując, że są one równe najwcześniejszym terminom zakończenia pierwszych robót w poprzedzającym częściowym potoku; przyjmujemy zerowe sprzężenia między frontami;
- Najwcześniejsze terminy rozpoczęcia pozostałych robót wyznacza się przyjmując, że dla rozpoczęcia danej roboty musi być zwolniony front i grupa robocza powinna zakończyć robotę na poprzednim froncie;
- Najpóźniejsze terminy rozpoczęcia i zakończenia robót wyznacza się według wyżej podanych zasad przyjmując kierunek odwrotny, czyli wyznaczając parametry od ostatniej roboty na ostatnim froncie do pierwszej roboty na pierwszym froncie. Poruszając się w odwrotnym kierunku przyjmujemy wartość mniejszą z porównywanych terminów i najpóźniejszego rozpoczęcia robót na sąsiednich frontach roboczych.

3. Algorytm macierzowego wyznaczania kolejności prowadzenia robót

Zagadnienie takiego uszeregowania frontów roboczych, na których należy prowadzić w porządku technologicznym roboty budowlane, aby zapewnić najkrótszy czas realizacji, jest bardziej złożone niż w przypadku podstawowych metod organizacji robót potokowych. Komplikuje się on na skutek wprowadzenia dodatkowych grup roboczych i podziału częściowych potoków na potoki szczegółowe.

Określenie racjonalnej kolejności prowadzenia robót na poszczególnych frontach roboczych w metodzie równoległo-potokowej polega na prowadzeniu działań zmierzających do minimalizacji drogi krytycznej. Wskaźnik GMM, charakteryzujący węzły drzewa wariantów, wyznacza się zakładając przejście drogi krytycznej przez każdy wiersz i kolumnę macierzy czasów trwania robót.

Do ustalania kolejności robót wykorzystano metodę podziału i ograniczeń. Uwzględniając specyfikę metod równoległo-potokowych, ograniczenia technologiczne i organizacyjne, stosujemy w procesie szeregowania zadań wskaźnik GMM (graniczne możliwe minimum), charakteryzujący węzły drzewa.

Czasy wykonania robót można przedstawić w postaci:

$$T = [t_{j,s}]$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$j = 1, \dots, m$$

$$s = 1, \dots, r$$

gdzie: $t_{j,s}$ jest czasem wykonania j -tego rodzaju robót na i -tym froncie roboczym przez grupę roboczą s .

$$Sk_{j,s} = \sum_{l=k+1}^n t_{l,j,s}$$

$$Sw_i = \sum_{j=1, \dots, m} t_{i,j,s}$$

$$Dk_{j,s} = T_{r,j,s} + \min \left(\sum_{\substack{l=j+1 \\ s=1, \dots, r_l}} t_{l,l,s} \right)$$

$$Dw_i = T_{r,1,S_D} + \sum_{\substack{l=r+1 \\ l \neq 1}} \min(t_{l,1,S_D}; t_{l,m,S_1}),$$

gdzie:

$$S_D, S_{s_1}, \text{ taki że } t_{l,1,S_D} \neq 0 \text{ oraz } t_{l,m,S_1} \neq 0,$$

natomiast $T_{r,j,s}$ jest czasem zakończenia robót na ustalonym froncie r przez grupę roboczą s , wykonującą j -ty rodzaj robót.

GMM obliczamy z zależności:

$$GMM = \max_{k+1 \leq i \leq n} \left(\max_{\substack{j=1, \dots, m \\ s=1, \dots, r_j}} (Sw_i + Dw_i); \max_{j=1, \dots, m} (Sk_{j,s} + Dk_{j,s}) \right)$$

Podobnie jak w innych metodach potokowych przeszukujemy drzewo wariantów rozwijając wariant o najmniejszym GMM, a kończymy przeszukiwanie wtedy, gdy minimum jest realizowane tylko przez warianty o ustalonych wszystkich wierszach macierzy.

Algorytm wyznaczania kolejności robót

Etap I

W miejsce pierwszego wiersza ustala się kolejno wszystkie wiersze macierzy. Dla tak ustalonych wierszy oblicza się GMM zakładając, że droga krytyczna przechodzi kolejno przez wszystkie nieustalone wiersze oraz przez wszystkie kolumny macierzy. Jednocześnie buduje się drzewo wariantów, przyjmując jako funkcję celu maksymalne, dla każdego ustalonego wiersza, wartości GMM. Rozwija się te gałęzie drzewa, których węzły mają najmniejszą (z maksymalnych) wielkość GMM.

Etap II

W miejsce drugiego i następnych wierszy ustala się pozostałe nieustalone wiersze. Wyznacza się wartości GMM dla tak zbudowanych macierzy pośrednich. Jednocześnie buduje

się drzewo wariantów, w którego węzłach wpisuje się maksymalne wartości GMM z każdej pośredniej macierzy dla ustalonych kolejno wierszy. Rozwija się te gałęzie perspektywiczne, których węzły mają najmniejsze wartości GMM. Jeżeli na wyższych poziomach drzewa wariantów wartości liczbowe GMM okażą się mniejsze od wyznaczonych aktualnie na danym poziomie, to należy do tych węzłów powracać i rozwijać je również

Etap III

Na tym etapie mamy nieustalone dwa wiersze macierzy, które dają już tylko dwie kombinacje. Możemy wyznaczyć rzeczywiste czasy trwania realizacji robót.

4. Zastosowanie algorytmu do harmonogramowania realizacji zespołu obiektów budowlanych

Zaplanowano realizację pięciu obiektów budowlanych. Roboty budowlane, ustalone na podstawie przedmiaru, scalono w cztery ciągi organizacyjne, uwzględniające jednakowy technologicznie zestaw robót budowlanych. Realizacja pierwszego oraz czwartego procesu technologicznego odbywać się będzie w dwóch szczegółowych, podwójnych potokach. Dane liczbowe dotyczące czasów realizacji poszczególnych robót na obiektach budowlanych przedstawione zostały w tabeli-macierzy.

Macierz czasów wykonania robót

OBIEKTY	C Z E Ś C I O W E P O T O K I					
	1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂
1	0 5 5		5 2 7	7 7 14		14 3 17
2		0 13 13	13 10 23	23 8 31	31 9 40	
3	5 7 12		23 17 40	40 6 46		46 2 48
4	12 8 20		40 3 43	46 4 50		50 8 58
5		13 7 20	43 5 48	50 12 62	62 15 77	

Dla zadanej kolejności realizacji robót 1-2-3-4-5 przewidywany czas wykonania wynosi 77 jednostek.

ETAP I		1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂							
I	0		5	7		14		Σ	Δ ₁	Δ ₂	GMM			
	5		2	7		3								
	5		7	14		17								
		13	10	8	9		40					0	7	47
	7		17	6		2	32					5	8	45
	8		3	4		8	23	5	2	30				
		7	5	12	15		39	0	9	48				
Σ	15	20	35	30	24	10								
Δ ₁	5	0	7	14	0	17								
Δ ₂	15	27	8	2	0	0								
GMM	35	47	50	46	24	27								

Według przedstawionej zasady budujemy serię macierzy pośrednich dla etapu I, otrzymując następujące wartości GMM:

Etap I : $GMM_1 = 50$

$GMM_2 = 72$

$GMM_3 = 64$

$GMM_4 = 53$

$GMM_5 = 52$

ETAP II		1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂					
I	0		5	7		14		Σ	Δ ₁	Δ ₂	GMM	
	5		2	7		3						
	5		7	14		17						
		0	13	23	31							
	2		13	10	8	9						40
	7		17	6		2	32	5	8	45		
	8		3	4		8	23	5	2	30		
		7	5	12	15		39	13	0	52		
Σ	15	7	25	22	15	10						
Δ ₁	5	13	23	31	40	17						
Δ ₂	15	32	8	2	0	0						
GMM	35	52	56	55	55	27						

Otrzymujemy dla etapu II następujące wartości GMM dla macierzy pośrednich:

Etap II : $GMM_1 = 56$

$$GMM_2 = 67$$

$$GMM_3 = 56$$

$$GMM_4 = 50$$

$$GMM_5 = 58$$

$$GMM_6 = 55$$

$$GMM_7 = 51$$

ETAP III

RF	1 ₁	1 ₂	2	3	4 ₁	4 ₂
1	0 5 5		5 2 7	7 7 14		14 3 17
5		0 7 7	7 5 12	14 12 26	26 15 41	
4	5 8 13		13 3 16	26 4 30		30 8 38
2		7 13 20	20 10 30	30 8 38	41 9 50	
3	13 7 20		30 17 47	47 6 53		53 2 55

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano skrócenie czasu realizacji zespołu obiektów z 77 jednostek do 55.

LITERATURA

1. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Zagadnienie synchronizacji kompleksów robót budowlanych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Automatyka, z.95, Gliwice 1988, s.79-85.
2. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Ustalanie kolejności w zbiorze potoków obejmujących kompleks obiektów budowlanych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Automatyka, z.85, Gliwice 1986, s.85-93.
3. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Harmonogramowanie pracy brygad roboczych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Automatyka, z.109, Gliwice 1992, s.97-102.
4. Hejducki Z., Mrozowicz J.: Harmonogramowanie pracy brygad roboczych z wykorzystaniem metody równoległo-potokowej z ciągłym prowadzeniem robót na obiektach budowlanych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Automatyka, z.115, Gliwice 1994, s.183-190.
5. Mrozowicz J.: Metody organizacji procesów budowlanych uwzględniające sprzężenia czasowe. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 1997, s.159.

Recenzent: Prof. Henryk Kowalowski

Abstract

Parallel-stream methods are more developed forms of a classic stream method. They are designed for planning the progress of site works. New methods of work organizing are described. They allow to synchronise progress of works taking into account standard technological conditions. A minimum-time criterion of optimisation is considered.

The problem discussed in the paper occurs when the streams consist of long-duration jobs. The synchronising work with few works with few working-groups of one specialisation.

An algorithm of scheduling the works is presented. It concerns the parallel-stream method with non-stop work at all site activities. This is continuation of the problem presented during ADPP conference in 1988, 1992 and 1994.