

HARMONOGRAMOWANIE PRACY BRYGAD REALIZUJĄCYCH BUDOWLANE PROCESY POWTARZALNE

Piotr JAŚKOWSKI*, Sławomir BIRUK*

* Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska
e-mail: p.jaskowski@pollub.pl
e-mail: s.biruk@pollub.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 30.09.2013 r., Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w maju 2014 r.

© Zeszyty Naukowe WSOWL

Harmonizacja procesów powtarzalnych realizowanych przez brygady na działkach roboczych wymaga nie tylko określenia terminów ich realizacji, ale również odpowiedniego doboru składu brygad. Należy przy tym dążyć nie wyłącznie do minimalizacji czasu realizacji przedsięwzięcia, lecz także do zapewnienia ciągłości pracy jednostek organizacyjnych. Ze względu na zależność pomiędzy tymi dążeniami (sprzeczność celów optymalizacji), jest konieczne rozpatrywanie problemu harmonizacji procesów powtarzalnych jako dwukryterialnego zagadnienia optymalizacji i poszukiwanie rozwiązań kompromisowych. W artykule problem ten opisano za pomocą modelu matematycznego programowania liniowego mieszanego, a opracowane podejście do harmonogramowania zilustrowano na przykładzie.

Słowa kluczowe: harmonogramowanie, przedsięwzięcia budowlane, powtarzalność procesów, ciągłość pracy,

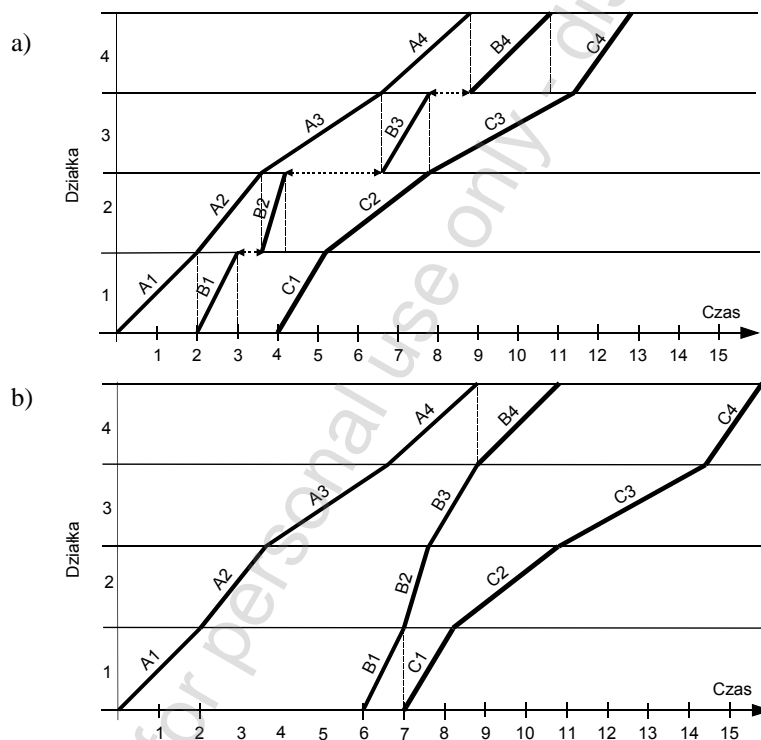
WSTĘP

Przedsięwzięcia budowlane często obejmują swym zakresem roboty wielokrotnie powtarzane na identycznych lub podobnych obiektach lub ich częściach, zwanych działkami roboczymi. Przykładem takich inwestycji są m.in. budowy wielokondygnacyjnych budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej (zazwyczaj wielosekcyjnych), zespołu obiektów, dróg, sieci instalacji zewnętrznych i in. obiektów inżynierskich.

Proces budowy tego typu obiektów, w celu efektywnej realizacji, jest zazwyczaj dzielony na mniejsze elementy (procesy proste, operacje robocze) powierzane do wykonania jednostkom organizacyjnym (brygadam, zespołom roboczym, pojedynczym maszynom i zestawom maszyn) o odpowiednich kwalifikacjach, realizujących zadania na kolejnych działkach roboczych. Harmonizacja pracy tych jednostek wymaga nie tylko uzgodnienia terminów realizacji poszczególnych procesów na działkach, lecz także właściwego doboru ich składu pod względem kwalifikacyjnym, a także ilościowym. Liczebność brygad, rodzaj i liczba maszyn wpływają na czas wykonania poszczególnych ciągów procesów [2, 5, 9].

W przypadku, gdy wielkość działek – mierzona prędkością robót każdego rodzaju – jest identyczna, można uzyskać najwyższy stopień harmonizacji, zapewniając ciągłość pracy zatrudnionych brygad i ciągłość realizacji robót na działkach roboczych. Jeżeli skład brygady wykonującej proces najbardziej prędko i wymagający największych frontów pracy (tzw. brygady prowadzącej) będzie ustalony jako maksymalny, a tempo pracy pozostałych brygad będzie dostosowane do tempa pracy brygady prowadzącej, czas realizacji przedsięwzięcia będzie minimalny.

W praktyce tego typu sytuacje występują rzadko. Względy użytkowe powodują konieczność zmiany rozstawów i przekrojów elementów nośnych na działkach roboczych, rozkładu pomieszczeń w rzucie i wysokości itd. W efekcie brak zależności wprost proporcjonalnej między wielkością działek a prędkością robót każdego rodzaju (tzw. niejednorodność procesów na działkach) uniemożliwia wyrównanie czasów realizacji poszczególnych procesów i utrudnia harmonizację pracy brygad. Istotnym utrudnieniem w zapewnieniu pracy ciągłej i równomiernej jest również dyskretność liczebności brygad (wydajności pracy nie można zmieniać w sposób ciągły), a także oddziaływanie czynników ryzyka, co wymaga – po dokonaniu odpowiednich analiz – uwzględnienia tego wpływu przy konstruowaniu projektu realizacji [4, 10–13].



Rys. 1. Porównanie czasów realizacji przedsięwzięcia (przykład)
a) bez zapewnienia ciągłości realizacji procesów A, B, C,
b) przy ciągłej pracy brygad A, B, C

Źródło: opracowanie własne

W artykule jest analizowany problem harmonizacji pracy brygad realizujących procesy powtarzalne na działkach niejednorodnych przy założeniu deterministycznych warunków działania. Istotnym zagadnieniem z punktu widzenia redukcji kosztów za-

trudnienia brygad jest ciągłość ich pracy. Redukcja przestojów w pracy brygad wpływa również na czas realizacji przedsięwzięć (rys. 1).

Problem harmonizacji w tym przypadku należy rozpatrywać jako zagadnienie poszukiwania kompromisu pomiędzy czasem realizacji przedsięwzięcia a wielkością przestojów w pracy brygad [1, 14].

1. METODY HARMONOGRAMOWANIA PROCESÓW POWTARZALNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WARUNKU CIĄGŁOŚCI PRACY BRYGAD

Obszerny przegląd metod harmonogramowania procesów powtarzalnych prezentowanych w publikacjach zagranicznych jest przedstawiony m.in. w pracy [14]. Zasady projektowania realizacji przedsięwzięć zgodnie z zasadami metody pracy równomiernej (z zachowaniem ciągłości pracy na działkach jednotypowych, jednorodnych i niejednorodnych) przedstawił w Polsce A. Dyżewski [2], a następnie rozwinął L. Rowiński [9].

J. Mrozowicz [7] i Z. Hejducki [3] opracowali metody optymalnego planowania, projektowania i sterowania realizacją złożonych procesów niejednorodnych (zgodnie z założeniami międzynarodowej szkoły potokowych metod pracy). W metodach tych eksponuje się jakościowy charakter sprzężeń występujących między poszczególnymi robotami. Rodzaje występujących sprzężeń stanowią podstawę klasyfikacji tych metod, a opracowane algorytmy umożliwiają wyznaczenie optymalnej kolejności realizacji działek. Metodę harmonogramowania z ciągłą realizacją procesów na działkach roboczych określono mianem metody organizacji budowy z zerowymi sprzężeniami między środkami realizacji.

Analiza dokonana przez M. Podolskiego [8] wskazuje na istotny związek zagadnień harmonogramowania robót budowlanych z teorią szeregowania zadań. Modeluje ona funkcjonowanie rzeczywistych systemów wytwarzania i produkcji przemysłowej. Analizowany problem w teorii szeregowania zadań jest określany mianem permutacyjnego problemu przepływowego z ograniczeniem „no-idle” (bez przestojów). Do jego rozwiązania opracowano wiele specjalizowanych algorytmów dokładnych.

Uwzględnienie warunku ciągłości wydłuża czas realizacji przedsięwzięć, szczególnie w przypadku, gdy czasy wykonania ciągów nie są wyrównane. Z tego powodu rozwijane są metody harmonogramowania, w celu wyznaczenia rozwiązań stanowiących kompromis między czasem realizacji przedsięwzięcia a wielkością przestojów. R. Marcinkowski [6] zastosował wycenę kosztów przestojów i opracował model problemu ustalania optymalnej kolejności realizacji obiektów budowlanych dla kryterium czasowo-kosztowego. M. Vanhoucke [14] opracował algorytm umożliwiający generowanie zależności czas – wielkość przestojów, pomijając jednak zagadnienie doboru składu brygad.

2. MODEL MATEMATYCZNY PROBLEMU HARMONIZACJI

Na każdej działce j ($j \in J, J = \{1, 2, \dots, m\}$) muszą być zrealizowane procesy rodzaju i ($i \in I, I = \{1, 2, \dots, n\}$). Oznaczmy jako (i, j) proces rodzaju i realizowany na działce j . Kolejność realizacji procesów każdego rodzaju na działce jest określona za pomocą grafu skierowanego $G = \langle I, A \rangle$ z jednym wierzchołkiem początkowym i końcowym, w którym I jest zbiorem wierzchołków grafu (tożsamym ze zbiorem ro-

dzajów procesów), a $A = I \times I$ jest zbiorem łuków łączących wierzchołki grafu (zależności pomiędzy procesami). Kolejność realizacji procesów każdego rodzaju jest taka sama na wszystkich działkach. Kolejność realizacji działek jest zgodna z ich numeracją.

Dla każdego procesu rodzaju i można określić zbiór W_i wariantów organizacji brygady roboczej. Wybór wariantów będzie modelowany za pomocą zmiennej binarnej $x_{i,w} \in \{0, 1\}$. Zmienna $x_{i,w}$ przyjmie wartość 1, jeżeli proces rodzaju i będzie realizowany przez brygadę zorganizowaną wariantem $w \in W_i$, wartość 0 – w przeciwnym przypadku. Na podstawie danych o pracochłonności robót na działkach roboczych i wydajnościach brygad dla każdego wariantu $w \in W_i$ można określić czas t_{ijw} wykonania procesu rodzaju i na działce j . Czas wykonania robót przez brygadę i na działce j oznaczymy jako $t_{i,j}$.

Optymalne warianty organizacji brygad roboczych oraz terminy $s_{i,j}$ rozpoczęcia procesów (i, j) przy ustalonym terminie dyrektywnym T zakończenia przedsięwzięcia można wyznaczyć, rozwiązując następujące zadanie programowania liniowego (mieszanego ze zmiennymi ciągłymi i binarnymi):

$$\min z: \quad z = \sum_{i \in I} \left(s_{i,m} - s_{i,1} - \sum_{j=1}^{m-1} t_{i,j} \right), \quad (1)$$

$$s_{1,1} = 0, \quad (2)$$

$$t_{i,j} = \sum_{w \in W_i} t_{i,j,w} \cdot x_{i,w}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad (3)$$

$$s_{n,m} + t_{n,m} \leq T, \quad (4)$$

$$s_{b,j} \geq s_{a,j} + t_{a,j}, \quad \forall (a, b) \in A, \quad \forall j \in J, \quad (5)$$

$$s_{i,j+1} \geq s_{i,j} + t_{i,j}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j = 1, 2, \dots, m-1, \quad (6)$$

$$\sum_{w \in W_i} x_{i,w} = 1, \quad \forall i \in I, \quad (7)$$

$$x_{i,w} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall w \in W_i, \quad (8)$$

$$s_{i,j} \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J. \quad (9)$$

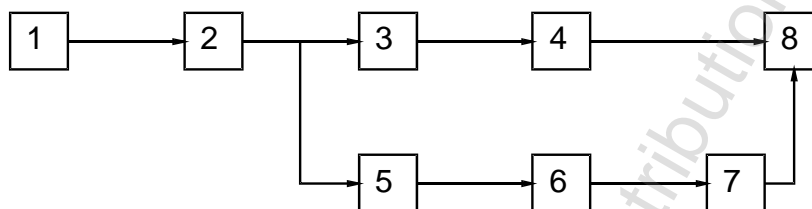
Funkcja celu (1) minimalizuje łączny czas przestojów w pracy brygad. Dla każdego rodzaju robót czas przestojów jest obliczany jako różnica między okresem ich realizacji przewidzianym w harmonogramie a sumą czasów wykonania tych robót na wszystkich działkach. W terminie 0 rozpoczyna się realizacja procesu pierwszego rodzaju na pierwszej działce (zależność (2)). Według zależności (3) jest obliczany czas realizacji każdego procesu (i, j) . Zakończenie przedsięwzięcia musi nastąpić przed upływem terminu dyrektywnego – zgodnie z nierównością (4). Terminy rozpoczęcia pozostałych procesów są ustalane na podstawie zależności (5) i (6), z uwzględnieniem kolejności zadanej grafem G i wynikającej z numeracji działek. Dla każdego rodzaju

procesu musi być dokonany wybór dokładnie jednego wariantu organizacji brygady – równanie (7). Zmienne modelu muszą spełnić warunki brzegowe (8) i (9).

3. PRZYKŁAD

Na rysunku 2 przedstawiono graf pomiędzy rodzajami robót dla przykładowego przedsięwzięcia obejmującego realizację ośmiu procesów (1 – roboty ziemne, 2 – konstrukcja budynku, 3 – dach, 4 – elewacja, 5 – ścianki działowe, 6 – tynki, 7 – podłóża, 8 – roboty zewnętrzne) na ośmiu obiektach (działkach roboczych).

W tabeli 1 zastawiono czasy (w dniach) wykonania poszczególnych procesów na działkach roboczych dla analizowanych wariantów organizacji brygad roboczych.



Rys. 2. Graf zależności kolejnościowych pomiędzy rodzajami robót (przykład)

Źródło: opracowanie własne

Model matematyczny dla danych w przykładzie rozwiązano stosując program LINGO 12.0 Optimization Modeling Software. Wyniki – dla różnych terminów dyrektywnych zakończenia przedsięwzięcia – zestawiono w tabeli 2. Numery ustalonych wariantów stanowią podstawę do określenia terminów rozpoczęcia procesów, jako równe wartościom minimalnym spełniającym warunki (5) i (6).

Minimalny czas realizacji przedsięwzięcia w przykładzie wynosi 155 dni. Dla tego rozwiązania łączny czas przerw w pracy brygad wynosi 63 dni (dla brygady wykonującej drugi rodzaj robót – 20 dni, trzeci – 23 dni, piąty – 17 i siódmy – 3 dni). Ciągłość pracy wszystkich brygad można uzyskać przy wydłużeniu czasu realizacji przedsięwzięcia o 25 dni (ok. 16 %) do 180 dni. W przypadku, gdy wykonawca może uzyskać od inwestora dodatkowe wynagrodzenie za przyspieszenie terminu zakończenia przedsięwzięcia, uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę analizy finansowej strat związanych z niezapewnieniem frontu pracy dla brygad.

W sytuacji, gdy termin dyrektywny jest mniejszy niż 180 dni, koszty strat spowodowanych przestojami powinny być uwzględnione przy kalkulacji oferty i podejmowaniu decyzji o przystąpieniu do przetargu na realizację przedsięwzięcia.

Tabela 1. Czasy wykonania procesów na działkach dla różnych wariantów organizacji brygad

Numer procesu	Numer wariantu	Numer działki							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	8	9	10	12	8	11	10	11
	2	7	6	11	15	8	12	9	9
	3	6	7	9	10	10	13	8	8
2	1	5	5	9	3	9	9	5	6
	2	8	7	7	5	11	13	5	4
	3	3	7	5	7	8	8	7	3
3	1	7	5	5	8	5	7	7	9

Numer procesu	Numer wariantu	Numer działki							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	2	4	16	6	6	7	6	8	6
	3	6	17	18	5	6	18	9	8
4	1	13	13	19	14	15	17	18	16
	2	14	12	17	17	13	17	15	13
	3	15	14	15	18	12	15	12	14
5	1	9	8	9	8	7	8	7	5
	2	10	7	7	8	8	7	7	8
	3	8	6	9	8	6	9	8	8
6	1	15	16	15	19	18	17	19	15
	2	14	16	17	16	15	16	17	16
	3	13	14	17	17	17	17	16	17
7	1	3	2	3	5	3	7	4	6
	2	4	2	4	4	2	5	7	6
	3	2	3	2	3	5	5	8	6
8	1	5	5	5	5	5	5	5	5

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2. Optymalne rozwiązania dla różnych terminów dyrektywnych zakończenia przedsięwzięcia

Termin dyrektywny T	Numer rodzaju robót								Łączny czas przerw w pracy brygad
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Numer wybranego wariantu								
155	3	3	1	3	3	2	3	1	63
160	3	3	2	3	1	2	2	1	39
165	3	3	3	1	1	2	3	1	21
170	3	3	3	3	1	2	3	1	12
175	3	2	3	3	1	2	3	1	3
180	3	1	3	3	1	2	1	1	0

Źródło: opracowanie własne

PODSUMOWANIE

Czas trwania przerw w realizacji ciągów procesów wpływa na koszty zatrudnienia brygad. Ich redukcja – w celu zwiększenia efektywności działania przedsiębiorstwa budowlanego – jest możliwa poprzez odpowiednie planowanie terminu dyrektywnego realizacji przedsięwzięcia, co potwierdziły uzyskane wyniki badań.

Uwzględnienie wariantowości składu brygad zapewnia lepsze efekty organizacyjne, lecz zwiększa złożoność obliczeniową modelu matematycznego zagadnienia. Do rozwiązania modelu w przykładzie zastosowano komercyjne oprogramowanie. Dążąc do poprawy aplikacyjnego charakteru zaproponowanego podejścia, wydaje się zasadne opracowanie dedykowanej aplikacji wspomagającej harmonogramowanie problemów praktycznych z wykorzystaniem algorytmów metaheurystycznych.

W artykule założono, że kolejność zajmowania działek przez brygady jest stała i ustalona *a priori*. Podobnie jak w problemach szeregowania zadań, lepsze rezultaty można uzyskać, dopuszczając jej zmianę. Problem ustalania optymalnej permutacji działek stanowi kierunek dalszych badań.

Wyniki prac były finansowane z środków statutowych przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (S/63/2013).

LITERATURA

1. Biruk S., Jaśkowski P., *The Work Continuity Constraints Problem in Construction Projects' Network Models*, [in:] "Archives of Civil Engineering" no. 1/2009, p. 29–41.
2. Dyżewski A., *Technologia i organizacja budowy. Część II: Organizacja i planowanie budowy*, Arkady, Warszawa 1971.
3. Hejducki Z., *Sprężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych*, [w:] *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej*, Monografie nr 34, 2000.
4. Jaśkowski P., Biruk S., *The Method for Improving Stability of Construction Project Schedules through Buffer Allocation*, [in:] "Technological and Economic Development of Economy", no. 17/2011, p. 429–444.
5. Jaworski K.M., *Metodologia projektowania budowy*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
6. Marcinkowski R., *Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżyniersko-budowlanej*, WAT, Warszawa 2002.
7. Mrozowicz J., *Metody organizacji procesów budowlanych uwzględniające sprężenia czasowe*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 1997.
8. Podolski M., *Analiza nowych zastosowań teorii szeregowania zadań w organizacji robot budowlanych*, Praca doktorska, Wrocław 2008.
9. Rowiński L., *Organizacja produkcji budowlanej*, Arkady, Warszawa 1982.
10. Skorupka D., *Modelling of risk in the building projects*, [in:] "Operations Research and Decision", no. 3-4/2006, p. 133–143.
11. Skorupka D., *Method of planning construction projects taking into account risk factors*, [in:] "Operations Research and Decision", no. 3/2009, p. 119–128.
12. Skorupka D., *The method of identification and quantification of construction projects risk*, [in:] "Archives of Civil Engineering", no. 4/2005, p. 647–662.
13. Skorupka D., *Identification and initial risk assessment of construction projects in Poland*, [in:] "Journal of Management in Engineering" no. 24/2008, p. 120–127.
14. Vanhoucke M., *Work continuity constraints in project scheduling*, [in:] "Journal of Construction Engineering and Management", ASCE, no. 132/2006, p. 14–25.

SCHEDULING REPETITIVE CONSTRUCTION PROCESSES

Summary

Harmonizing the work of crews that conduct repetitive construction processes involves not only scheduling with respect to time, but also determining the crew's composition. With repetitive processes, minimizing the total project duration is usually not the sole objective – another one is continuity of the crews' work. As the objectives are interdependent and contradictory, it is necessary to approach this scheduling problem as a bicriteria optimization problem, and to search for a compromise. The paper uses the mixed linear programming to model this problem and uses a case study to illustrate it.

Keywords: construction scheduling, crews selection, repetitive processes, work continuity

NOTY BIOGRAFICZNE

dr inż. Piotr JAŚKOWSKI – adiunkt, Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, p.o. kierownik Katedry Inżynierii Procesów Budowlanych. Członek Sekcji Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych KILiW PAN, EURO Working Group “OR in Sustainable Development and Civil Engineering” oraz International Group on Reliability. Autor ok. 100 publikacji z zakresu organizacji i zarządzania w budownictwie. Zainteresowania naukowe: organizacja produkcji budowlanej, harmonogramowanie przedsięwzięć, harmonogramy predyktywne, badania operacyjne, algorytmy metaheurystyczne.

dr inż. Sławomir BIRUK – adiunkt, Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Procesów Budowlanych. Członek EURO Working Group “OR in Sustainable Development and Civil Engineering” oraz International Group on Reliability. Autor ok. 70 publikacji z zakresu organizacji i zarządzania w budownictwie. Zainteresowania naukowe: technologia robót budowlanych, harmonogramowanie przedsięwzięć, sieci stochastyczne, badania symulacyjne.

