

## HARMONOGRAMOWANIE PRZEDSIĘWZIĘCIA BUDOWLANEGO PRZY OGRANICZONEJ W CZASIE DOSTĘPNOŚCI PODWYKONAWCÓW

**Sławomir BIRUK\***

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

Artykuł wpłynął do redakcji 16.07.2012 r. Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w październiku 2012 r.

*Realizacja złożonych przedsięwzięć budowlanych obejmuje zadania powierzane podwykonawcom, wymagające specjalistycznych umiejętności lub których wykonanie przekracza zdolności produkcyjne generalnego wykonawcy w umownym okresie realizacji. W celu harmonizacji procesów jest konieczne dokonanie doboru kooperantów w oparciu o oferty cenowe, a także zsynchronizowanie terminów ich zatrudnienia z portfelem ich bieżących i przyszłych zleceń. W pracy przedstawiono model matematyczny zagadnienia oraz przykład doboru podwykonawców budowlanych.*

**Słowa kluczowe:** harmonogramowanie przedsięwzięcia budowlane, analiza czasowo-kosztowa, wybór podwykonawcy

### WSTĘP

Racjonalna gospodarka zasobami przedsiębiorstwa wymaga dysponowania planami pracy lub zapotrzebowania na zasoby [5]. Większość prac badawczych z zakresu harmonogramowania koncentruje się na modelowaniu przedsięwzięć i poszukiwaniu dokładnych oraz heurystycznych metod rozwiązywania modeli, w celu projektowania optymalnych (lub suboptymalnych) harmonogramów realizacji. Wstępny harmonogram przedsięwzięcia jest podstawą zawierania kontraktów z podwykonawcami i ustalenia terminów ich zatrudnienia. Planiści zazwyczaj biorą pod uwagę dwa kryteria optymalizacji harmonogramów: czas i koszt, uwzględniając je łącznie lub oddzielnie [7, 8, 9]. Wielu autorów dąży do maksymalizacji bieżącej wartości przedsięwzięcia [1, 4, 10, 16].

Wiele metod i modeli matematycznych zostało opracowanych do wyrównywania zapotrzebowania na zasoby odnawialne i nieodnawialne oraz harmonogramowania przedsięwzięć z uwzględnieniem dostępności zasobów. Projektant harmonogramów może też założyć, że procesy ze względu na dostępność zasobów mogą rozpoczynać się w określonych okresach (time-window constraints) lub w terminach dyrektywnych (time-schedule constraints) [3].

Redukcja czasu realizacji przedsięwzięcia może przynieść mierzalne korzyści w formie dodatkowego wynagrodzenia dla wykonawcy oraz możliwości wcześniejszego przystąpienia do użytkowania obiektu (dla inwestora). W rachunku wyników należy uwzględnić dodatkowe nakłady niezbędne do skrócenia czasu realizacji (np. praca w nadgodzinach, koszty wynajmu dodatkowego sprzętu budowlanego i maszyn). Z tego powodu manager powinien dokonać analizy czasowo-kosztowej przedsięwzięcia. W literaturze opisano wiele ujęć takiej analizy wykorzystujących funkcję użyteczności do rozwiązania problemu dwukryterialnego czas-koszt [6, 8] lub metody analizy wielokryterialnej [12]. Na koszt i czas realizacji przedsięwzięcia wpływa wybór podwykonawców.

Struktura organizacyjna przedsięwzięcia budowlanego składa się z własnych jednostek wykonawczych generalnego wykonawcy i kooperujących przedsiębiorstw budowlanych. W dzisiejszej praktyce coraz częściej przedsięwzięciem budowlanym zarządzają specjalistyczne biura inżynierskie (system realizacji *construction management*). Liczba podwykonawców rośnie wraz ze wzrostem wielkości i złożoności przedsięwzięcia. Struktura organizacyjna musi być podporządkowana celom nadrzędnym przedsięwzięcia, którymi najczęściej są czas, koszt i jakość. Inwestor w systemie wykonawstwa własnego (częściowego) lub generalny wykonawca często już na etapie planowania inwestycji musi sporządzić realistyczny harmonogram wstępny i budżet. Podstawą planowania są wstępne oferty składane przez potencjalnych podwykonawców, na których podstawie można oszacować koszty przedsięwzięcia i terminy wykonywania procesów budowlanych. Stąd też wybór właściwych podwykonawców jest czynnikiem kluczowym dla powodzenia całego przedsięwzięcia. Jakość robót zapewnia między innymi stała współpraca ze sprawdzonymi przedsiębiorstwami budowlanymi, a dążenie do osiągnięcia w najlepszym stopniu pozostałych celów nadrzędnych przedsięwzięcia można traktować jako problem optymalizacyjny dwukryterialny: czas-koszt.

Zarządzanie dużą liczbą podmiotów gospodarczych jest wyzwaniem dla zarządzającego przedsięwzięciem, szczególnie trudno jest dotrzymać termin umowy [13, 14, 15, 17]. Z punktu widzenia zarządzającego, możliwość zlecenia robót może prowadzić do usprawnienia działania organizacji, obniżenia kosztów i zapewnienia wysokiej jakości. Każde przedsięwzięcie budowlane jest inne (inny zakres robót, miejsce realizacji, jednostkowy projekt) i nie ma stałego zestawu kryteriów do oceny podwykonawców [1]. Zlecający prace powinien zawsze jednak brać pod uwagę kilka podstawowych kryteriów przy wyborze potencjalnych podwykonawców zapraszanych do składania ofert: jakość wykonywanych robót, wydajność, dysponowanie wykwalifikowanym personelem i właściwym sprzętem, a także możliwość podjęcia robót w określonym terminie [2].

## 1. MODEL MATEMATYCZNY

Przedsięwzięcie jest modelowane za pomocą skierowanego, niecyklicznego i spójnego unigrafu  $G = \langle V, E \rangle$  bez pętli, w którym wyróżniono jeden wierzchołek początkowy i jeden końcowy.  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  jest zbiorem wierzchołków grafu (procesów budowlanych),  $E \subset V \times V$  to relacja dwuczłonowa określająca zależności kolejnościowe między procesami (łuki grafu). Każdy z procesów budowlanych  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) może być wykonywany przez innego podwykonawcę. Liczba możliwych wariantów procesu  $i$  (potencjalnych podwykonawców, którzy złożyli oferty) wynosi  $m_i$ . Podwykonawca  $j$

składając ofertę na wykonanie procesu  $i$ , musi określić najwcześniejszy  $s_{ij}^0$  oraz najpóźniejszy  $s_{ij}^1$  możliwy termin rozpoczęcia robót (niekolidujący z terminami realizacji innych zleceń) oraz zaplanować czas  $t_{ij}$  i skalkulować koszt  $k_{ij}$  prac, o realizację których zabiega składając ofertę.

Zagadnienie polega na takim wyborze podwykonawców, aby czas realizacji przedsięwzięcia nie przekroczył terminu dyrektywnego  $T_d$  przy minimalnym koszcie realizacji całego przedsięwzięcia  $K$ . Zadanie to można zapisać w postaci:

$$\min K : K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} k_{ij} \cdot \delta_{ij} \quad (1)$$

$$f_n \leq T_d \quad (2)$$

$$s_i \geq \sum_{j=1}^{m_i} s_{ij}^0 \cdot \delta_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$s_i \leq \sum_{j=1}^{m_i} s_{ij}^1 \cdot \delta_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$f_i = s_i + t_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$s_i \geq f_r, \quad \forall (i, r) \in E \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} \delta_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\delta_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m_i \quad (8)$$

Ograniczenie (2) zapewnia, że przedsięwzięcie zakończy się przed terminem dyrektywnym  $T_d$ . Ograniczenia (3) i (4) uzależniają rozpoczęcie procesu budowlanego w oknie czasowym terminów realizacji wskazanych przez wybranego podwykonawcę robót. Równania (5) i (6) pozwalają na obliczenie terminów rozpoczęcia i zakończenia procesów w modelu sieciowym, a zależność (8) gwarantuje, że tylko jeden podwykonawca zostanie wybrany do wykonywania każdej z czynności modelu sieciowego. Wybór podwykonawcy do realizacji procesu jest modelowany za pomocą zmiennej binarnej  $\delta_{ij}$ . Przyjmuje ona wartość 1, wówczas gdy proces  $i$  będzie wykonywany wariantem  $j$  (przez podwykonawcę  $j$ ), wartość 0 w przeciwnym przypadku.

## 2. PRZYKŁAD

Na rysunku 1 przedstawiono graf zależności technologiczno-organizacyjnych przedsięwzięcia budowlanego. Każdy proces może być wykonywany przez pięciu różnych podwykonawców, określających pięć różnych możliwych wariantów realizacyjnych. W tabeli 1 zestawiono najwcześniejsze, natomiast w tabeli 2 najpóźniejsze terminy rozpoczynania wariantów realizacyjnych procesów budowlanych, określone przez podwykonawców składających oferty. Tabela 3 zawiera czasy określone w ofercie przez podwykonawców, natomiast tabela 4 odpowiadające im koszty. Model został rozwiązany za pomocą solvera Lingo 12 (licencja LGPC2 126819/Politechnika Lubel-

ską), wykorzystującego wewnętrzny język opisu problemów decyzyjnych. Dzięki zaimplementowaniu w pakiecie Lingo „zbiorów” (*SETS*) program przybiera zwięzłą postać (pominięto moduł deklaracji danych):

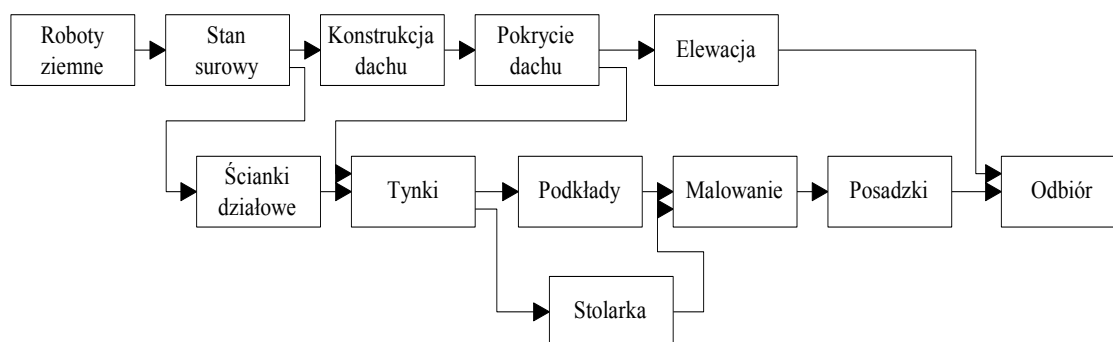
```

MIN=@SUM(VAR(I, J) : COST(I, J) * RL(I, J));
FINISH(@SIZE(TASKS)) <= 252;
@FOR(TASKS(J) | J #GT# 1: START(J) >= @MAX(PRED(I, J) : FINISH(I)));
@FOR(TASKS(I) : START(I) >= @SUM(VAR(I, J) | J #LE# NUM(I) :
    ES(I, J) * RL(I, J)));
@FOR(TASKS(I) : START(I) <= @SUM(VAR(I, J) | J #LE# NUM(I) :
    LS(I, J) * RL(I, J)));
@FOR(TASKS(I) : FINISH(I) = START(I) + @SUM(VAR(I, J) | J #LE# NUM(I) :
    TIME_V(I, J) * RL(I, J)));
@FOR(VAR(I, J) | J #LE# NUM(I) : @SOS3('BIN'+TASKS(I), RL(I, J)));
@FOR(VAR(I, J) | J #GT# NUM(I) : RL(I, J) = 0);
    
```

Tabela 1. Najwcześniejszy terminy rozpoczynania wariantów realizacyjnych procesów budowlanych (dni)

Proces	Wariant wykonania				
	1	2	3	4	5
Roboty ziemne	0	0	5	10	15
Stan surowy	5	10	25	35	25
Konstrukcja dachu	120	140	145	145	150
Pokrycie dachu	125	150	150	155	160
Elewacja	125	150	150	155	160
Ścianki działowe	115	135	140	145	150
Tynki	125	165	170	175	180
Pokłady	140	160	165	160	160
Malowanie	180	200	200	205	210
Posadzki	190	205	210	215	220
Stolarka	150	175	175	180	180
Odbiór	bez ograniczeń				

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 1. Graf przedsięwzięcia budowlanego (przykład)

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 2. Najpóźniejsze terminy rozpoczynania wariantów realizacyjnych procesów budowlanych (dni)

Proces	Wariant wykonania				
	1	2	3	4	5
Roboty ziemne	5	10	15	25	15
Stan surowy	25	35	45	55	65
Konstrukcja dachu	150	160	165	175	170
Pokrycie dachu	165	175	180	185	190
Elewacja	175	185	190	200	210
Ścianki działowe	150	160	170	175	185
Tynki	170	180	185	190	200
Pokłady	185	195	195	210	220
Malowanie	215	230	245	250	250
Posadzki	225	240	245	270	280
Stolarka	175	190	190	210	220
Odbiór	bez ograniczeń				

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 3. Czasy wykonania wariantów realizacyjnych procesów budowlanych (dni)

Proces	Wariant wykonania				
	1	2	3	4	5
Roboty ziemne	5	6	7	6	10
Stan surowy	130	140	160	140	140
Konstrukcja dachu	15	20	15	10	15
Pokrycie dachu	15	15	20	19	17
Elewacja	30	30	35	33	32
Ścianki działowe	20	30	25	25	28
Tynki	15	20	17	16	19
Pokłady	30	31	32	35	30
Malowanie	20	25	30	29	28
Posadzki	20	25	24	23	22
Stolarka	30	25	40	38	36
Odbiór	1				

Źródło: Opracowanie własne

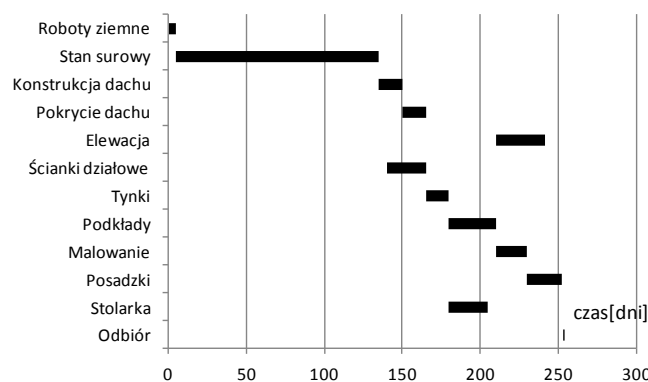
Tabela 4. Koszty wariantów realizacyjnych procesów budowlanych (tys. zł)

Proces	Wariant wykonania				
	1	2	3	4	5
Roboty ziemne	200	180	160	150	140
Stan surowy	22000	19000	18000	18000	17000
Konstrukcja dachu	140	130	120	110	100
Pokrycie dachu	175	170	165	160	155
Elewacja	165	150	140	130	125
Ścianki działowe	340	320	315	310	305
Tynki	170	160	150	155	150
Pokłady	3200	3000	2900	2850	2800
Malowanie	230	200	180	175	170
Posadzki	80	70	60	60	55
Stolarka	500	400	380	370	350
Odbiór	0				

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki analizy kosztowo-czasowej przedsięwzięcia przedstawiono w tabeli 5. Najkrótszy czas realizacji wynosi 254 dni i odpowiada mu koszt równy 2650000 zł. Harmonogram dla tego rozwiązania (rys. 2) uzyskano dla następujących wariantów: roboty ziemne – wariant 2, stan surowy – 1, konstrukcja dachu – 1, pokrycie dachu – 1, elewacja – 5, ścianki działowe – 3, tynki – 1, podkłady – 5, malowanie – 1, posadzki – 5, stolarka – 1.

Czasowi realizacji 300 dni odpowiada koszt równy 21360000 zł. Wydłużanie czasu realizacji nie przynosi dalszej redukcji kosztów.



Rys. 2. Harmonogram optymalny przy najkrótszym czasie realizacji równym 254 dni

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 5. Zależność kosztowo-czasowa analizowanego przedsięwzięcia (przykład)

Czas realizacji [dni]	Koszt wykonania [tys. zł]	Czas realizacji [dni]	Koszt wykonania [tys. zł]	Czas realizacji [dni]	Koszt wykonania [tys. zł]	Czas realizacji [dni]	Koszt wykonania [tys. zł]
		262	26530	272	26425	282	23400
254	2650	264	26505	274	26405	284	23395
256	26590	266	26475	276	23450	286	23385
258	26535	268	26445	278	23425	288	23385
260	26535	270	26445	280	23405	300	21360

Źródło: Opracowanie własne

## PODSUMOWANIE

Zaprojektowanie harmonogramu realizacji robót budowlanych, uwzględniającego ograniczenia realizacyjne, może być jednym z kluczowych czynników zwiększenia efektywności działalności przedsiębiorstwa budowlanego, poprzez skracanie cykli realizacji obiektów i okresu zamrażania środków obrotowych. Zaproponowany sposób może być pomocny przy projektowaniu struktury przedsięwzięcia budowlanego, przede wszystkim w przypadku stosowania metody częściowego wykonawstwa lub zlecenia robót dużej liczbie podwykonawców. Planowanie przedsięwzięcia z uwzględnieniem możliwości wykonawczych kooperujących przedsiębiorstw pozwala na pogodzenie celów różnych stron, co w przyszłości może prowadzić do zwiększenia zaufania i powstania trwałych powiązań w sieci biznesu.

Dalsze badania będą koncentrować się na opracowaniu algorytmu opartego na metodzie ograniczeń i podziału do rozwiązania przedstawionego modelu matematycz-

nego problemu harmonogramowania i porównaniu jego skuteczności z komercyjnym oprogramowaniem. Kierunkiem dalszych prac będzie także weryfikacja możliwości zastosowania metody w praktyce projektowania realizacji przedsięwzięć budowlanych.

## LITERATURA

1. Abbasi G.Y., Arabiat Y.A., *A Heuristic to maximize the net present value for resource-constrained project-scheduling problems*, [in:] "Project Management Journal", no. 32( 2)/2001, pp. 17-24.
2. Arslan G., Kivrak S., Birgonul M.T., Dikmen I., *Improving sub-contractor selection process in construction projects: Web-based sub-contractor evaluation system (WEBSSES)*, [in:] "Automation in Construction", no. 7(4)/2008, pp. 480-488.
3. Chen Y.L., Rinks D., Tang K., *Critical path in an activity network with time constraints*, [in:] "European Journal of Operational Research", no.100/1997, pp. 122-133.
4. Doersch R.H., Patterson J.H., *Scheduling a project to maximize its present value: a zero-one programming approach*, [in:] "Management Science", no. 23(8)/1977, pp. 882-889.
5. Herroelen W., Leus R., *The construction of stable project baseline schedules*, [in:] "European Journal of Operational Research", no. 156(3)/2004, pp. 550-565.
6. Jaśkowski P., Sobotka A., *Scheduling construction projects using evolutionary algorithm*, [in:] "Journal of Construction Engineering and Management", no. 132(8)/2006, pp. 861-870.
7. Kapliński O., *Modelling of construction processes. A managerial approach*, Polish Academy of Sciences, The Committee on Civil Engineering and Hydroengineering, Institute of Fundamental Technological Research, Warszawa 1997.
8. Kasprowicz T., *Multi-objective optimization of construction schedules*, [in:] "Computing in Civil Engineering", no. 1/1994, New York 1994, pp. 185-190.
9. Kasprowicz T., *Scheduling building works under conditions of risk or uncertainty*, [in:] "Archives of Civil Engineering", no. 43(3)/1997, pp. 243-258.
10. Neumann K., Zimmermann J., *Procedures for resource leveling and net present value problems in project scheduling with general temporal and resource constraints*, [in:] "European Journal of Operational Research", no. 127/2000, pp. 425-443.
11. Ng S.T., Luu Ch.D.T., Chu A.W.K., *Delineating criteria for subcontractors registration considering divergence in skill base and scales*, [in:] "International Journal of Project Management", no. 26(4)/2008, pp. 448-456.
12. Leu S.-S., Yang Ch.-H., *GA-based multicriteria optimal model for construction scheduling*, [in:] "Journal of Construction Engineering and Management", no. 125(6)/1999, pp. 420-427.
13. Skorupka D., *The method of identification and quantification of construction projects risk*, [in:] "Archives of Civil Engineering", no. LI 4/2005, pp. 647-662.

14. Skorupka D., *Modelling of risk in the building projects*, [in:] *Operations Research and Decision*, (2006), pp. 133-143.
15. Skorupka D., *Method of planning construction projects taking into account risk factors*, [in:] *Operations Research and Decision*, (2009), pp. 119-128.
16. Ulusoy G., Özdamar L., *A heuristic scheduling algorithm for improving the duration and net present value of a project*, [in:] "International Journal of Operations & Production Management", no. 15(1)/1995, pp. 89-98.
17. Wang W.C., Liu J.J., *Factor-based path analysis to support subcontractor management*, [in:] "International Journal of Project Management", no. 23(2)/2005, pp. 109-120.

## **SCHEDULING CONSTRUCTION PROJECT WITH LIMITED AVAILABILITY OF SUBCONTRACTORS**

### **Summary**

*Complex construction projects involve subcontracting some tasks, as the main contractor is not able to complete them due to resource unavailability, inadequate expertise, or for purely economic reasons. To coordinate operations on the building site, subcontractors availability has to be considered with respect to the project requirements and subcontractors' project portfolios. The paper presents a mathematical model of this problem and an example of its implementation in the selection of subcontractors.*

**Keywords:** *scheduling, construction projects, time-cost analysis, subcontractor selection*