

Kryteria optymalizacji harmonogramów budowlanych

Dr hab. inż. Roman Marcinkowski, prof. PW

Politechnika Warszawska Filia w Płocku, Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii

ISTOTA HARMONIZACJI PRACY

Według [4] „Harmonizacja pracy to dobór współdziałających wykonawców określonego zadania roboczego (tu przedsięwzięcia) i synchronizacja ich pracy w czasie na podstawie sformułowanego przez K. Adamieckiego prawa harmonii [1], które brzmi: „(...) jeżeli praca wykonywana jest przez kilka jednostek lub zespołów, to otrzymuje się tym lepszy skutek ekonomiczny, im dokładniej dobrane są do siebie współdziałające jednostki lub zespoły i im dokładniej uwzględnione są czasy ich działania (...)”. Środkiem ułatwiającym harmonizację pracy jest harmonogram pracy”.

Jeżeli przyjmiemy, że harmonizacja określa właściwy dobór wykonawców działań cząstkowych przedsięwzięcia (dalej nazywanych zadaniami) i synchronizację ich pracy w czasie, to w procesie opracowania harmonogramu powinniśmy rozwiązać trzy problemy [8]:

- problem rozdziału posiadanych zasobów do wykonania zadań (zagadnienie alokacji zasobów),
- problem ustalenia kolejności realizacji zadań niezależnych pod względem technologicznym, a wymagających kolejnego wykonania ze względów organizacyjnych (zagadnienie szeregowania zadań),
- problem ustalenia terminarza realizacji zadań (analiza czasowa).

Problemy te powinny być rozwiązywane w sposób kompleksowy z uwzględnieniem wzajemnych związków i zależności. Indywidualne korzystne rozwiązanie jednego z nich nie prowadzi zazwyczaj do uzyskania dobrego harmonogramu, do osiągnięcia harmonii pracy. W tym kontekście pytamy: jaki harmonogram jest najlepszy? Aby odpowiedzieć na to pytanie, trzeba sformułować kryterium, według którego będziemy wartościowali dopuszczalne harmonogramy. Harmonogramy dopuszczalne zaś, to takie struktury zadaniowo-czasowe, które spełniają ograniczenia terminowe, zachowują porządek technologiczny realizacji robót i generują potrzeby zasobowe w dostosowaniu do ich poziomu dostępności.

Optymalny harmonogram to harmonogram uwzględniający wszystkie ograniczenia planu realizacji i spełniający kryterium sprawności działania (wykonania przedsięwzięcia). Głównym problemem rozstrzyganym w procesie optymalizacji harmonogramów jest ustalenie kolejności realizacji zadań przez jednostki organizacyjne zasobów czynnych (tzw. problem szeregowania zadań), pomocniczym natomiast – alokacja zasobów na zadania, których czas wykonania zależy od liczby skierowanych do nich środków pracy.

W opracowaniu harmonogramu przedsięwzięć budowlanych istotne ograniczenia wypływają z posiadanych zasobów. Przez pryzmat zasobów charakteryzuje się procesy budowlane realizowane określonymi technologiami. W każdym wyróżnionym procesie określa się nakłady pracy zasobów czynnych oraz zu-

życie zasobów biernych. Obie te charakterystyki określane są mianem nakładów rzeczowych. Nakłady pracy zasobów czynnych – pracochłonność zadania – i liczba skierowanych do jego wykonania jednostek zasobów czynnych wyznaczają czas zrealizowania zadania:

$$t_i = \max_{l \in S_i} \frac{p_{i,l}}{a_{i,l}} \quad (1)$$

gdzie:

$p_{i,l}$ – pracochłonność i -tego zadania w odniesieniu do l -tego zasobu,

$a_{i,l}$ – liczba skierowanych zasobów czynnych l -tego rodzaju do realizacji zadania i ,

S_i – zbiór zasobów czynnych dla i -tego zadania.

W wielu przypadkach optymalizacji harmonogramów nie uwzględnia się pełnych ograniczeń zasobowych. I słusznie. Zdając sobie sprawę ze złożoności zadania optymalizacji harmonogramu, należy w modelu zadania ujmować tylko te ograniczenia, które w rzeczywistości występują. Nie ma jednak optymalizacji harmonogramu bez analizy zasobów.

MODELOWANIE I OPTIMALIZACJA KOLEJNOŚCI WYKONANIA ZADAŃ

Najistotniejszym elementem każdego harmonogramu jest struktura zadaniowa planowanego przedsięwzięcia. Plan bowiem opisujemy listą zadań, dla których chcemy ustalić terminy realizacji. Ustala je planujący na podstawie analizy przedsięwzięcia, którego realizację planuje. Są to lokalizacyjnie określone zbiory prac podstawowych, z często ustalonym terminem rozpoczęcia realizacji i/lub jej zakończenia, do realizacji których trzeba wyznaczyć zespół wykonawczy (robotników, maszyny, jednostki organizacyjne).

Istotnym ograniczeniem w opracowaniu harmonogramu przedsięwzięć budowlanych jest technologia prac. Implikuje się w niej podział przedsięwzięcia na zadania i określa wyjściową kolejność realizacji wyróżnionych zadań. W analizach optymalizacyjnych kolejność taka musi być modelowana.

W praktyce stosuje się dwa sposoby modelowania kolejności zadań: przy wykorzystaniu teorii grafów i sieci oraz poprzez struktury macierzowe. Wykorzystanie sposobu zależy głównie od struktury organizacyjnej przedsięwzięcia.

W przedsięwzięciach rodzaju „kompleks operacji” [6, 8] ograniczenia kolejnościowe modelujemy grafem zorientowanym G , acyklicznym, w konwencji krawędziowej:

$$G = \{I, P, K\}, I = \{1, 2, \dots, m\}, i \in I$$

gdzie:

I – zbiór numerów wyróżnionych zadań,

P_i – numer zdarzenia początkowego dla zadania i ,

K_i – numer zdarzenia końcowego dla zadania i .

Grafem G określa się kolejność realizacji wyróżnionych zadań wynikającą z technologicznego porządku robót i ograniczeń frontu robót, nie uwzględnia się natomiast kolejności wynikającej z ograniczonego dostępu do środków produkcji (zasobów). Ko-

lejność ta jest ustalana w procesie optymalizacji harmonogramu – ściślej w rozwiązaniu problemu szeregowania zadań [4, 5].

Problem szeregowania zadań może być w zadaniu optymalizacyjnym połączony z wyborem sposobu realizacji zadań. Do każdego zadania wyznacza się $2 \div 3$ sposoby wykonania, różniące się zatrudnieniem (rodzajami i liczbami zasobów czynnych skierowanych do wykonania zadania) i oceną czasu wykonania. Rozwiązując zadanie optymalizacyjne, ustala się do każdego zadania w planowanym przedsięwzięciu sposób i terminy wykonania.

W przedsięwzięciach realizowanych „sposobem potokowym” [6, 7, 8] technologia realizacji zadań jest identyfikowana strukturą macierzy czasów realizacji procesów pracy przez zespoły specjalistyczne (brygady) na wyróżnionych frontach robót oraz sprzężenia między nimi. Model takiego systemu przedstawił autor w [7, 8].

W rozwiązaniu problemu poszukuje się harmonogramu robót określającego terminy rozpoczęcia i zakończenia pracy przez brygady na frontach, przy najkorzystniejszej kolejności frontów robót w systemie realizacyjnym. Dla różnych uszeregowania frontów w pracy brygad otrzymuje się odmienne harmonogramy charakteryzujące się różnym wykorzystaniem środków produkcji (brygad) i czasem zajętości oraz zakończenia prac na frontach robót. Zadaniem w tym systemie jest proces roboczy realizowany na froncie robót przez brygadę. Ponieważ brygady są niezmiennie, pozostaje w tym przypadku rozwiązanie problemu szeregowania zadań przed brygadami.

KRYTERIA OPTIMALIZACJI HARMONOGRAMÓW I WARUNKI ICH WYBORU

W literaturze z zakresu optymalizacji harmonogramów [1, 2, 3, 5, 6, 8] proponuje się szereg różnych kryteriów oceny optymalności harmonogramów. Ogólnie można wyróżnić trzy ich rodzaje, tj.: czasowe, kosztowo-czasowe i kosztowe.

W kryteriach czasowych minimalizuje się zużycie czasu na wykonanie przedsięwzięcia lub jego części składowych. W szczególności, w zależności od rodzaju, można minimalizować:

- termin zakończenia realizacji przedsięwzięcia:

$$\min : Z_1 = \max \{ F_i \}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

- średni ważony czas przepływu zadań:

$$\min : Z_2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \{ F_i - d_i^r \} \cdot w_i^s \quad (3)$$

- średnie wazone opóźnienie wykonania zadań:

$$\min : Z_3 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m w_i^s \cdot [\max(0, F_i - d_i)] \quad (4)$$

gdzie:

F_i – termin zakończenia realizacji i -tego zadania w przedsięwzięciu,
 d_i^r – termin dostępności i -tego zadania (od tego momentu i -te zadanie oczekuje na rozpoczęcie),
 d_i – dyrektywny żądany termin zakończenia i -tego zadania,
 w_i^s – współczynnik wagowy przypisany i -temu zadaniu.

W kryteriach czasowo-kosztowych wyraża się sumaryczne koszty strat spowodowane wydłużonym czasem realizacji przedsięwzięcia lub jego części, niewykorzystaniem potencjału wykonawczego realizatora, przerwami w pracy specjalistycznych

jednostek produkcyjnych itp. Kryteria te powstają przez adaptację kryteriów czasowych (wycenę czasu), są zbieżne z nimi, a jednocześnie bardziej zasadne. Można nimi minimalizować koszty strat spowodowane:

- późniejszym terminem zakończenia przedsięwzięcia:

$$\min : Z_4 = \max \left\{ 0, \max_i \{ F_i \} - T^k \right\} \cdot K, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

- przekroczeniem dopuszczalnych terminów zakończenia zadań:

$$\min : Z_5 = \sum_{i=1}^m \{ F_i - d_i \} \cdot K_i^d \quad (6)$$

- niewykorzystaniem potencjału wykonawczego realizatora:

$$\min : Z_6 = \sum_{t=0}^H \left\{ \sum_{k=1}^r \left[z_{kt} - \sum_{i \in B_t} p_{ik} \right] \cdot C_k \right\} \cdot \gamma_t \quad (7)$$

gdzie:

F_i – termin zakończenia realizacji i -tego zadania przedsięwzięcia,
 T^k – dyrektywny termin zakończenia przedsięwzięcia,
 d_i – dyrektywny żądany termin zakończenia i -tego zadania,
 $z_{k,t}$ – poziom dostępności pracy k -tego zasobu w przedziale czasu t ,
 $p_{i,k}$ – poziom zapotrzebowania na pracę k -tego zasobu do realizacji i -tego zadania,
 H – liczba wyróżnionych przedziałów czasu,
 r – liczba rodzajów zasobów,
 B_t – zbiór zadań realizowanych w przedziale czasu t ,
 K, K_i^d, C_k – jednostkowe koszty strat,
 γ_t – stopień istotności niewykorzystania potencjału realizatora w przedziale czasu t .

Kryteria kosztowe związane są z różnymi sposobami realizacji zadań w przedsięwzięciu (różną technologią) i kosztowym wyrażaniem angażowanych zasobów. Stosując kryteria kosztowe, poszukuje się najczęściej takich sposobów wykonania zadań, które przy spełnieniu ograniczeń czasowych i zasobowych określają minimalne koszty związane z opłacaniem angażowanych w nich zasobów. Kryteria te mogą określać:

- sumaryczne koszty zatrudnienia ludzi i sprzętu (zasobów czynnych)

$$\min : Z_7 = \sum_{k=1}^{r^z} \left[C_k \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{S_i} p_{ijk}^z \cdot t_{ij} \cdot S_{ij}^s \right] \quad (8)$$

- sumaryczne koszty zużycia środków produkcji (nakładów rzeczowych)

$$\min : Z_8 = \sum_{l=1}^{r^m+r^z} \left[C_l \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{S_i} p_{ijl} \cdot S_{ij}^s \right] \quad (9)$$

gdzie:

r^z, r^m – liczba rodzajów zasobów odpowiednio: czynnych i biernych,
 C_k – jednostkowe koszty pracy k -tego zasobu czynnego lub zużycia (nakładu) zasobu rodzaju biernego,
 $p_{i,j,k}^z$ – poziom zatrudnienia k -tego zasobu czynnego w realizacji i -tego zadania sposobem j ,
 $p_{i,j,l}$ – nakłady l -tego zasobu na realizację zadania i sposobem j ,
 t_{ij} – czas realizacji i -tego zadania sposobem j ,
 m – liczba zadań w planowanym przedsięwzięciu,
 S_i – liczba sposobów wykonania i -tego zadania,
 S_{ij}^s – zmienna binarna określająca decyzję wyboru sposobu realizacji zadania, ($S_{i,j}^s = 1$ gdy i -te zadanie jest wykonywane j -tym sposobem, w innym przypadku $S_{i,j}^s = 0$).

Wybór odpowiedniego kryterium uwarunkowany jest celem, jaki chcemy osiągnąć w procesie opracowania harmonogramu,

a ten z kolei zależy od tego, czyje interesy mają być zaspokojone, jakie są uwarunkowania wyższych ogniw zarządzania wykonawcą, warunki inwestora oraz stan potencjału wykonawczego.

Wydaje się, że najbardziej zasadnymi kryteriami optymalizacyjnymi są kryteria kosztowe. Zastosowanie ich w praktyce wiąże się jednak z wielowariantowym spojrzeniem na technologię i organizację realizacji robót, co wymaga dużych nakładów na przygotowanie danych i realizację analiz projektowych. Kryteria te są słuszne w odniesieniu do zamkniętego zbioru prac jako przedsięwzięcia. Nie są jednak uzasadnione w sytuacji planowania produkcji przedsiębiorstwa budowlanego. Przedsiębiorcy nie mogą bowiem skupiać uwagi na jednym przedsięwzięciu, lecz na programach produkcyjnych, które nie mają formy skończonej.

Najbardziej użyteczne dla przedsiębiorcy są kryteria czasowo-kosztowe. Realizuje się nimi znaną zasadę minimalizacji kosztu straconego czasu (kryterium Z_6) oraz minimalizacji opóźnień (kryteria Z_4 i Z_5).

W pierwszym przypadku ustala się koszt straconego czasu pracy każdego zasobu czynnego. Jest on utratą potencjalnego przychodu przedsiębiorcy, obliczanego jak w [9], za każdą godzinę przestoju z zależności:

$$C_k = c_k^j \cdot \frac{w_{kp}}{100} \cdot \left(1 + \frac{w_z}{100}\right) \quad (10)$$

gdzie:

C_k – jednostkowy koszt straty z tytułu braku pracy dla zasobu k ,
 c_k^j – cena jednostkowa pracy k -tego zasobu (określona w kosztorysie),
 w_{kp} , w_z – wskaźniki procentowe kosztów pośrednich i zysku (określone w kosztorysie).

Mając tak określone wskaźniki kosztowe, planujący zlicza koszty strat za przestój zasobów w badanym harmonogramie. Ma przy tym możliwość wartościowania tych kosztów w skali czasu.

W drugim przypadku wycenia się koszty niedotrzymania terminów umownych. Wynikają one z uzgodnionych między stronami kar i utraty przychodów. W tym miejscu można spytać, czy harmonogram nie powinien określać struktury zadaniowo-czasowej w zgodzie z terminami dyrektywnymi. Tak, powinien, ale w wielu przypadkach jest to niemożliwe. W tych sytuacjach planujący musi minimalizować skutki podjętych zbyt optymistycznych umów i zobowiązań.

Bardzo często kryteria Z_4 , Z_5 i Z_6 łączy się w jedną formułę do oceny jakości harmonogramu. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę ze skomplikowania zadania optymalizacji harmonogramu przy takiej funkcji celu. Aktualnie nie wypracowano ścisłych algorytmów rozwiązujących takie zadanie. Niemniej mamy możliwości generowania dopuszczalnych harmonogramów metodami symulacyjnymi. Stosując schemat metody Monte Carlo, możemy wartościować jakość kolejno wyznaczanych harmonogramów i poszukiwać rozwiązań suboptymalnych.

Należy podkreślić, kryteria czasowo-kosztowe uelastyczniają modele optymalizacyjne i, jak wynika z przedstawionych zależności, w prosty sposób mogą być sprowadzone do kryteriów czasowych. Nie mogąc ustalić rzeczywistych kosztów strat (np. z braku odpowiednich danych), można traktować koszty jednostkowe jako porównawcze wskaźniki lub wyłączać znaczenie określonych charakterystyk ilościowych poprzez przyjmowanie wartości zerowych kosztów.

Z kryteriów czasowych najszerze zastosowanie znalazły kryteria minimalizujące czas zrealizowania całości przedsię-

wzięcia. Kryteria te są zasadne w sytuacji, gdy problem harmonizacji dotyczy jednego spójnego przedsięwzięcia, gdy liczy się tylko efekt końcowy. Jeżeli zależy nam na szybkim zrealizowaniu niektórych zadań wchodzących w zakres przedsięwzięcia, powinniśmy stosować kryterium Z_2 , przyjmując do zadań „pilnych” duże wskaźniki wagowe. Kryterium Z_3 może być stosowane w przypadku jednoznacznego określenia do wyróżnionych zadań – dyrektywnych terminów ich zakończenia.

Podsumowując można stwierdzić, że problem wyboru kryterium optymalizacji harmonogramu może być jednoznacznie rozwiązany tylko w przypadku pełnej znajomości sytuacji decyzyjnej. W modelach teoretycznych, przyjmując dane kryterium, należy określić ramy zastosowań modelu.

ELASTYCZNOŚĆ KRYTERIUM CZASOWO-KOSZTOWEGO W METODZIE PRACY POTOKOWEJ

Do wyboru najlepszego z harmonogramów sformułowano w metodzie pracy potokowej [5] kryterium czasowo-kosztowe, wyrażające sumaryczne koszty strat z tytułu braku ciągłości pracy brygad (braku frontu robót dla brygady) oraz „kar” z tytułu niedotrzymania terminów dyrektywnych zakończenia robót na obiektach. Założono zatem, że znane są koszty jednostkowe strat spowodowane przestojem brygad: $C^b = [c_j^b]$ ($j = 1, 2, \dots, m$) oraz koszty jednostkowe strat z tytułu niedotrzymania terminów dyrektywnych zakończenia robót na obiektach $C^o = [c_i^o]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) oraz sformułowano funkcję celu [7]:

$$Z = \sum_{j=1}^m \left[y_{nj} - r_j - \sum_{i=1}^n t_{ij} \right] \cdot c_j^b + \sum_{i \in Q} [w_{im} - z_i] \cdot c_i^o \quad (11)$$

gdzie:

z_i – terminy zakończenia prac na obiektach ($i = 1, 2, \dots, n$),
 r_j – terminy dostępności brygad ($j = 1, 2, \dots, m$),
 y_{nj} – termin zakończenia pracy przez j -tą brygadę w realizacji n obiektów (zbioru O),
 w_{im} – termin zakończenia robót na i -tym obiekcie przez m brygad roboczych (zbiór B),
 Q – zbiór obiektów, dla których $w_{im} > z_i$.

Sformułowane kryterium wydaje się dość uniwersalne, współczynnikom kosztowym można bowiem nadać różne znaczenia i wartości. Obiektywizacja oceny harmonogramu może być osiągnięta jednak jedynie wtedy, gdy koszty jednostkowe strat będą skalkulowane realnie. Jeżeli takiej możliwości nie ma, koszty jednostkowe mogą pełnić rolę współczynników wagowych, umożliwiających zapis preferencji planisty.

Koszty jednostkowe przyrównane do jedności przekształcają funkcję (11) w wyrażenie czasu – funkcja ta będzie określać sumaryczny czas przestoju brygad i przekroczenia dyrektywnych terminów zakończenia robót na obiektach. Dla brygad i obiektów, których ciągłość pracy i terminowość nie generują skutków ujemnych, należy definiować koszty jednostkowe równe zero. Zaś jeżeli zależy nam na jak najszybszym zrealizowaniu zbioru obiektów, należy przyjąć niewspółmiernie duże koszty dla brygady kończącej realizację procesów na obiektach.

Zestawienie podstawowych możliwości zmiany preferencji w optymalizacji harmonogramu przy zastosowaniu formuły (11) przedstawiono w tabl. 1.

Modyfikacja funkcji kryterialnej powoduje zniekształcenie realnej jej wartości. Dlatego też nie należy ujawniać tej warto-

Tabl. 1. Wartości kosztów c_j^b ($j = 1, 2, \dots, m$) i c_i^o ($i = 1, 2, \dots, n$) przyjmowane w celu modyfikacji preferencji w optymalizacji harmonogramów [7]

Lp.	Sformułowanie preferencji – cel	c_j^b	c_i^o
1.	Minimalizacja kosztów strat spowodowanych przerwami w pracy brygad	$c_j^b = \text{realne}$	$c_i^o = 0$
2.	Minimalizacja kosztów strat spowodowanych niedotrzymaniem terminów dyrektywnych zakończenia robót na obiektach	$c_j^b = 0$	$c_i^o = \text{realne}$
3.	Minimalizacja sumarycznych kosztów strat	$c_j^b = \text{realne}$	$c_i^o = \text{realne}$
4.	Minimalizacja przerw w pracy brygad (w sensie czasu)	$c_j^b = 1$	$c_i^o = 0$
5.	Minimalizacja sumarycznego czasu przekroczeń terminów dyrektywnych zakończenia robót na obiektach	$c_j^b = 0$	$c_i^o = 1$
6.	Minimalizacja cyklu realizacji przedsięwzięcia (równoznaczne z minimalizacją terminu zakończenia przedsięwzięcia)	$c_n^b = M^*$	$c_i^o = 0$

* M jest dużą liczbą, a wartość funkcji celu jest nierealna. Wynikiem optymalizacji jest termin zakończenia przedsięwzięcia odczytany z harmonogramu.

ści. Wyznaczony harmonogram powinien być charakteryzowany terminarzem realizacji procesów na obiektach oraz obiektywnymi wskaźnikami jakości rozwiązania odniesionymi do poszczególnych brygad i poszczególnych obiektów.

LITERATURA

- Adamiecki K.: O nauce organizacji. Warszawa, PWE, Warszawa 1985.
- Jaworski K. M.: Metodologia projektowania realizacji budowy. PWN, Warszawa 1999.
- Jaworski K. M.: Wielokryterialna analiza jakości harmonogramów budowlanych. Przegląd Budowlany, nr 1, styczeń 2002.
- Johnson R.: The Economics of Building: A Practical Guide for the Design Professional. John Wiley, New York 1999.
- Kasprowicz T.: Dwukryterialna optymalizacja organizacji robót inżynierjno-budowlanych. Archiwum Inżynierii Lądowej 3-4/91.
- Praca zbiorowa pod red. Olega Kaplińskiego: Metody i modele badań w inżynierii przedsięwzięć budowlanych. Monografia z serii Studia z zakresu inżynierii nr 57, Wydawnictwo Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Instytutu Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 2007.
- Marcinkowski R., Jakubowski G.: Symulacyjno-analityczne harmonogramowanie przedsięwzięć realizowanych w systemach pracy potokowej. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 87, Seria: Studia i Materiały Nr 18, Wrocław 2006, 121-128.
- Marcinkowski R.: Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżynierjno-budowlanej. Wydawnictwo WAT, Warszawa 2002.
- Marcinkowski R.: Harmonogram produkcji przedsiębiorstwa budowlanego. Poradnik Inspektora Nadzoru, Kierownika Budowy i Inwestora Nr 12/2009, Warszawskie Centrum Postępu Techniczno-Organizacyjnego Budownictwa WACETOB, str. 20-28
- Marcinkowski R.: Quality Assessment of Construction Schedules, Communications, Scientific Letters of the University of Žilina, 1/2003 Słowacja.