Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach

Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe
Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach
ISSN 2083-8611 Nr 241 · 2015

Informatyka i Ekonometria 3

Piotr Jaśkowski

Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Inżynierii Procesów Budowlanych
p.jaskowski@pollub.pl

Sławomir Biruk

Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Inżynierii Procesów Budowlanych
s.biruk@pollub.pl

METODA REDUKCJI CZASU REALIZACJI LINIOWYCH OBIEKTÓW BUDOWLANYCH*

Streszczenie: Przedsięwzięcia budowlane często obejmują swym zakresem roboty powtarzane na częściach obiektów. Proces budowy tych obiektów jest zazwyczaj dzielony na mniejsze elementy powierzane jednostkom organizacyjnym. Stosowaną w praktyce formą graficzną harmonogramów takich przedsięwzięć są cyklogramy. Najczęściej przyjmowanym kryterium ich optymalizacji jest minimalizacja czasu wykonania. Również w trakcie realizacji przedsięwzięć, w przypadku wystąpienia zakłóceń, jest konieczne podjęcie działań prowadzących do redukcji czasu realizacji pozostałych zadań. Najczęściej stosowane metody to: praca w godzinach nadliczbowych, alokacja dodatkowych zasobów lub relokacja zasobów zaangażowanych. W artykule rozważany jest problem doboru tych działań w celu redukcji czasu realizacji przedsięwzięcia liniowego pod kątem minimalizacji związanych z nimi kosztów. Opracowano model matematyczny zagadnienia. Sposób rozwiązania problemu przedstawiono na przykładzie.

Słowa kluczowe: projektowanie realizacji przedsięwzięć liniowych, optymalizacja harmonogramów, programowanie liniowe.

Wprowadzenie

Obiekty budowlane ze względu na układ przestrzenny klasyfikuje się na dwie kategorie: obiekty kubaturowe (np. budynki mieszkalne i użyteczności publicznej) oraz liniowe (np. tunele, drogi, rurociągi i sieci instalacji). Do harmonogramowania wykonania obiektów liniowych – ze względu na ich specyfikę – są rozwijane odmienne metody.

* Wyniki prac były finansowane ze środków statutowych przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (S/63/2015).

Podstawowym celem optymalizacji harmonogramów ich realizacji jest minimalizacja planowanego czasu wykonania. Również w fazie realizacji przedsięwzięć budowlanych wykonawca w ramach kierowania operatywnego musi podejmować działania w celu redukcji czasu i niwelowania ujemnego wpływu zjawisk losowych. Jeżeli przebieg realizacji znacznie różni się od przyjętego harmonogramu z ustalonym terminem dyrektywnym, konieczna jest jego aktualizacja. W sytuacji gdy na podstawie dotychczasowego postępu robót można wnioskować o trudnościach w dotrzymaniu terminu dyrektywnego, jest konieczne wprowadzenie działań skracających czas realizacji przedsięwzięcia. Zastosowanie takich działań można rozważać również na etapie harmonogramowania przedsięwzięcia – przed przystąpieniem do jego realizacji. Bakry, Moselhi i Zayed [2014] zaliczają do nich m.in. pracę w nadgodzinach, wydłużony tydzień pracy, wprowadzenie systemu pracy zmianowej bądź zatrudnienie brygad lub maszyn o większej wydajności pracy. Skrócenie czasu wykonania procesów (lub fragmentów ciągów) decydujących o terminie zakończenia przedsięwzięcia jest możliwe również poprzez alokację dodatkowych zasobów, dotychczas angażowanych do realizacji procesów niekrytycznych (dokładniej – zgodnie z terminologią stosowaną w harmonogramowaniu przedsięwzięć liniowych – procesów nienależących do ciągów kontrolnych [Harmelink i Rowings, 1998]).

Działania te wymagają dodatkowych nakładów finansowych. Ze względu na specyfikę robót liniowych, efekt w postaci skrócenia czasu wykonania przedsięwzięcia może być uzyskany poprzez przerwanie ciągłości realizacji niektórych procesów lub zaangażowanie mniej wydajnych zasobów, co umożliwia wcześniejsze rozpoczęcie procesów następujących po nich w kolejności technologicznej.

W artykule rozważany jest problem doboru optymalnych działań z uwzględnieniem ich kosztów i efektów w postaci skrócenia czasu realizacji przedsięwzięcia liniowego. Dotychczas opracowane metody iteracyjne rozwiązania tego problemu, prezentowane w literaturze [Bakry, Moselhi i Zayed, 2014; Hassanein i Moselhi, 2005], nie gwarantują uzyskania wyników optymalnych.

1. Specyfika organizacji robót liniowych w budownictwie

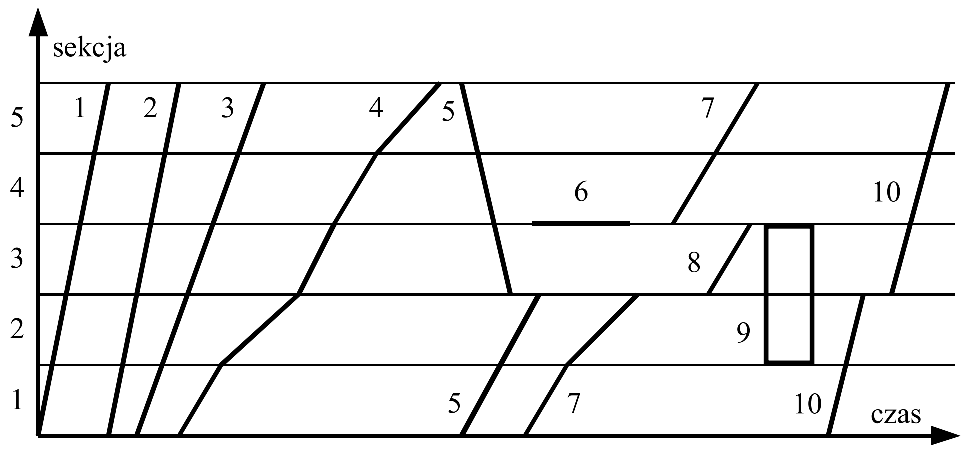
Stosowanie właściwej metody planowania i kontroli zwiększa prawdopodobieństwo realizacji przedsięwzięcia w założonych terminach, zgodnie z przyjętym budżetem i zgodnie z wymaganiami jakości [Mattila i Abraham, 1998]. Specyfika przedsięwzięć liniowych (powtarzalność prowadzonych robót na kolejnych działkach roboczych) spowodowała powstanie oraz rozwój nowych technik wspomagających projektowanie ich realizacji.

Wykorzystanie przy projektowaniu realizacji obiektów liniowych tradycyjnie stosowanych w budownictwie metod sieciowych i odzwierciedlanie planowanego przebiegu ich wykonania za pomocą harmonogramów belkowych (wykresów Gantta) jest krytykowane w literaturze m.in. ze względu na brak możliwości uwzględnienia warunku ciągłości pracy brygad roboczych oraz maszyn budowlanych, nawet gdy są stosowane metody wyrównywania zasobów [El-Rayes i Moselhi, 1998]. Russell i Wong [1993] krytykują przyjmowanie kryterium ciągłości wykorzystania zasobów jako kryterium nadrzędnego, ale powinno być brane pod uwagę ze względu na koszty przestojów w pracy zasobów.

Przedsięwzięcia budowlane o charakterze liniowym w naturalny sposób są dzielone na mniejsze zadania, a granicę podziału części obiektów stanowią węzły komunikacyjne, studnie rewizyjne czy też połączenia rur [Lutz i Hijazi, 1993; Moselhi i Hassanein, 2003].

Czasy wykonania robót na każdym odcinku mogą być różne ze względu na odmienne warunki realizacyjne, np. występowanie poszerzeń na łukach drogi lub zmienność warunków geologicznych. Zmienna wydajność powoduje możliwość wystąpienia przerw w pracy brygad roboczych, zmniejszenie stopnia wykorzystania sprzętu budowlanego i może przyczynić się do wzrostu kosztów oraz wydłużenia czasu realizacji całego przedsięwzięcia.

Planowany przebieg realizacji przedsięwzięcia o charakterze liniowym najwygodniej jest przedstawić w postaci harmonogramu o dwóch osiach współrzędnych, z których jedna odwzorowuje czas, a druga lokalizację kolejnych sekcji − odcinków drogi, tunelu czy rurociągu. Na rys. 1 przedstawiono przykład takiego harmonogramu.

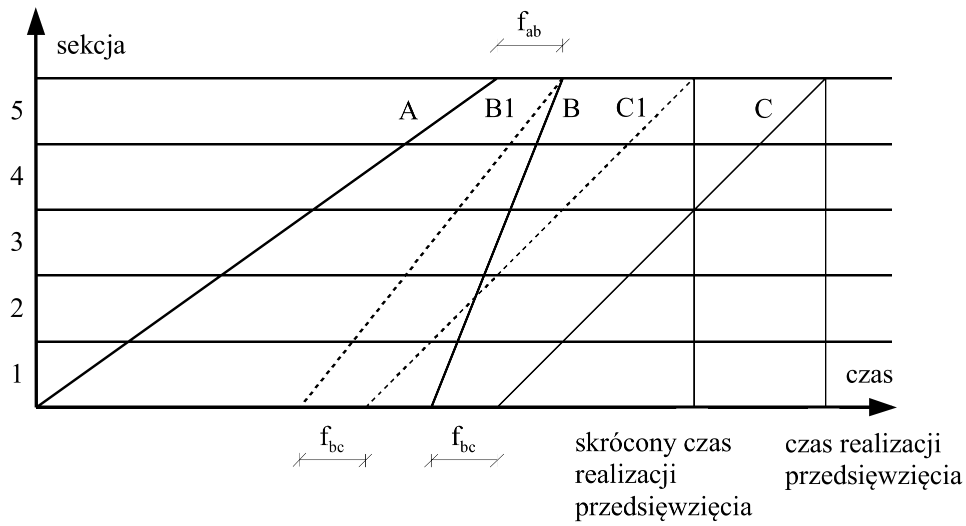


Rys. 1. Przykład cyklogramu robót liniowych

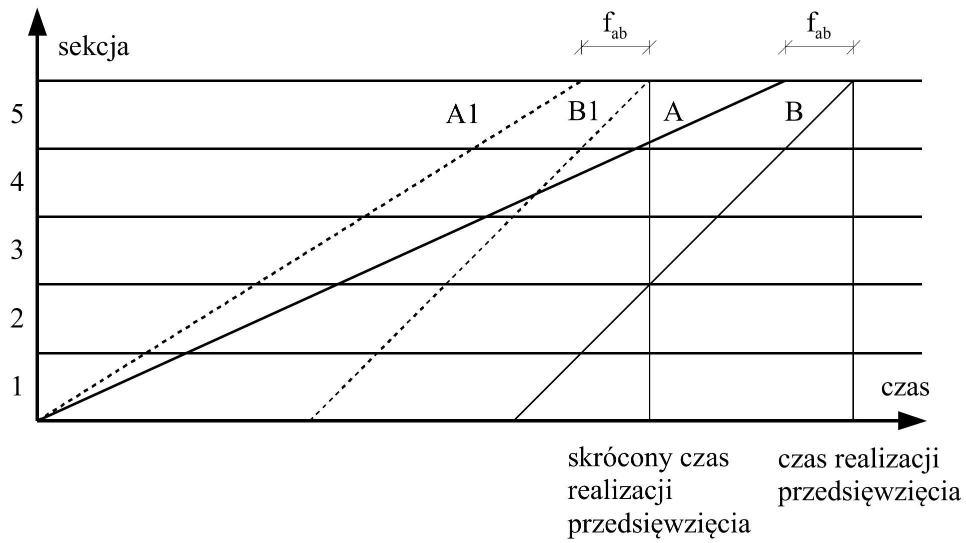
Procesy 1 i 2 (np. układanie nawierzchni betonowej, zagęszczanie podbudowy) są realizowane na wszystkich odcinkach drogi z tą samą wydajnością. Jest to przykład zastosowania metody pracy równomiernej, wykonywanej na działach jednotypowych (o jednakowej wielkości). Proces 3 jest realizowany na wszystkich działkach, lecz z wydajnością mniejszą niż w przypadku procesów 1 i 2. Poprzez właściwy dobór składu brygady roboczej lub zmianę wyposażenia technicznego można wyrównać czasy wykonania tych procesów na wszystkich działkach (sekcjach, odcinkach). W przypadku zmiennej ilości robót na poszczególnych odcinkach (mogą one wynikać np. z odmiennych warunków gruntowych, zmiany przekroju poprzecznego drogi) zmienia się także czas wykonania robót na poszczególnych sekcjach – proces 4 na rys. 1. Proces 5 jest realizowany równocześnie z dwóch kierunków przez dwie brygady o różnej wydajności. Roboty skupione (punktowe) są prowadzone tylko w jednej lokalizacji (granica sekcji 3 i 4 – rys. 1) – np. wykonanie przepustu drogowego lub innego obiektu inżynierskiego. Obiekt taki jest naturalną granicą podziału na sekcje robót liniowych. Proces 7 odwzorowuje roboty prowadzone tylko na wybranych sekcjach (np. koryto drogi nie jest wykonywane w obrębie przeprawy mostowej). Częstym przypadkiem jest wykonywanie robót danego typu tylko w obrębie jednej sekcji (np. przęsło mostu) – proces 8 na rys. 1. Proces 9 to roboty typu powierzchniowego. Mogą być realizowane jednocześnie na kilku odcinkach (sekcjach) przez pewien okres budowy (np. montaż ekranów akustycznych). Mogą być także dopuszczalne przerwy w realizacji robót (proces 10 na rys. 1).

Projektowanie realizacji robót liniowych wymaga zachowania odpowiednich zależności pomiędzy terminami rozpoczynania i kończenia robót. Na rys. 2 przedstawiono sposób odwzorowania przebiegu wykonania trzech procesów. Proces B może rozpocząć się z opóźnieniem f_{ab} dni w stosunku do terminu rozpoczęcia procesu A na każdej lokalizacji robót.

Graniczne zbliżenie procesów na końcu ostatniego odcinka robót umożliwia wcześniejsze rozpoczęcie procesu B i realizowanie go z mniejszą wydajnością (tak jak proces $B1$ na rys. 2). Zaangażowanie maszyn budowlanych o niższej wydajności może prowadzić do zmniejszenia kosztów realizacji tych robót. Krytyczne zbliżenie pomiędzy procesami B i C występuje na początku pierwszego odcinka (różnica terminów realizacji tych procesów na początku sekcji 1 jest równa minimalnej wielkości opóźnienia f_{bc}), co umożliwia wcześniejsze rozpoczęcie procesu C (tak jak proces $C1$) i w efekcie skrócenie terminu realizacji całego przedsięwzięcia przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów jego realizacji.



Rys. 2. Harmonogram realizacji trzech procesów liniowych (przykład – opis w tekście)



Rys. 3. Harmonogram realizacji dwóch procesów liniowych (przykład – opis w tekście)

Odmienną sytuację przedstawiono na rys. 3. Krytyczne zbliżenie pomiędzy procesami *A* i *B* występuje na końcu ostatniego odcinka obiektu. Skrócenie czasu realizacji procesu poprzedzającego *A* (z przebiegiem wykonania jak proces *A*1) umożliwia wcześniejsze rozpoczęcie następnika *B* (jak *B*1) i skrócenie czasu realizacji przedsięwzięcia.

Klasyczna metodyka planowania przedsięwzięć liniowych jest kojarzona głównie ze sposobem graficznym przedstawiania przebiegu realizacji, co znacznie ogranicza jej popularność oraz spektrum zastosowań. Stąd podjęto próby matematycznej formalizacji opisu problemów ich harmonogramowania.

Harmelink i Rowings [1998] opracowali metodę wyznaczania ciągu krytycznego przedsięwzięcia liniowego, przez analogię do metody *CPM*, definiowanego jako ciąg czynności, które muszą być zrealizowane zgodnie z harmonogramem, aby ukończyć planowane przedsięwzięcie w zaplanowanym terminie. W harmonogramie uwzględnione mogą być czynności liniowe, powierzchniowe i miejscowe. W przeciwieństwie do metody *CPM* ciąg kontrolny mogą tworzyć części procesów, co lepiej odwzorowuje specyfikę przedsięwzięć liniowych. W przypadku stosowania metody *CPM* do planowania przedsięwzięć liniowych, procesy ciągłe są dzielone na odcinki, co powoduje, że ścieżka krytyczna przechodzi przez arbitralnie wybrane punkty podziału. Wyznaczenie ciągu kontrolnego jest istotne dla projektanta, bowiem pozwala na obliczenie zapasów czasu, analizę i optymalizację pracy zasobów odnawialnych (brygad i maszyn). Podobną koncepcję identyfikacji czynności krytycznych na działkach niejednorodnych (o różnej wielkości) przedstawili Harris i Ioannou [1998].

Mattila i Abraham [1998] zaprezentowali metodę wyrównywania zasobów w przedsięwzięciach liniowych, wykorzystującą ideę ciągów kontrolnych. Model programowania liniowego binarnego został rozwiązany za pomocą pakietu *LINDO*. Wyrównanie zasobów jest możliwe poprzez zmianę wydajności brygad roboczych realizujących procesy poza ciągami kontrolnymi. Ten sam problem analizował Georgy [2008], stosując do optymalizacji algorytm genetyczny.

El-Rayes i Moselhi [1998] opracowali dwuetapowy algorytm iteracyjny planowania przedsięwzięć liniowych, minimalizujący czas przestojów w pracy brygad, uwzględniający ograniczoną dostępność zasobów – w ustalonych oknach czasowych. Ograniczenie to jest szczególnie ważne w przypadku, gdy wykonawca wykonuje równocześnie roboty o podobnym zakresie na kilku placach budów. Roboty na danym odcinku mogą być wykonywane przez jedną z dostępnych brygad, których wydajności pracy są różne (inne są czasy wykonania robót przez różne brygady na tym samym odcinku robót).

2. Formalizacja matematyczna problemu

Na każdej działce (niedokończonej sekcji obiektu liniowego) j ($j \in J$, $J = \{1, 2, ..., m\}$) muszą być zrealizowane powtarzalne procesy rodzaju i, należące do zbioru $I = \{1, 2, ..., n\}$. Do realizacji każdego procesu zorganizowano odrębną brygadę roboczą lub zestaw maszyn. Kolejność realizacji powtarzalnych procesów każdego rodzaju na każdej działce j jest określona za pomocą grafu skierowanego $G_j = \langle I, A_j \rangle$ z jednym wierzchołkiem początkowym i końcowym, w którym I jest zbiorem wierzchołków grafu (tożsamym ze zbiorem rodzajów procesów), a $A_j \subset I \times I$ jest zbiorem łuków łączących wierzchołki grafu (zależności pomiędzy procesami). Zależności między procesami mają charakter relacji kolejnościowych typu: rozpoczęcie procesu b po zakończeniu jego bezpośredniego poprzednika a, lecz nie wcześniej niż po upływie $f_{a,b}$ dni. Przy określaniu opóźnienia $f_{a,b}$ należy uwzględnić czas niezbędny na wykonanie procesu a na odcinku równym długości frontu pracy jednostki organizacyjnej realizującej ten proces oraz jednostki realizującej proces następny (b). Pozwoli to uniknąć równoczesnej pracy dwóch brygad na jednym froncie robót i zmniejszenia wydajności ich pracy.

Kolejność działek, na których sukcesywnie jest realizowany proces i, jest określona w postaci permutacji $\pi_i(j) = c_{i,j}$, a postęp robót na działce – według poczynionych wcześniej ustaleń (zgodnie z kilometrażem lub od końca sekcji do jej początku). Kolejność działki – ze względu na przyjęty sposób formalizacji matematycznej – musi być określona również w przypadku, gdy dany proces nie jest na niej realizowany (przyjęta kolejność nie wpływa na uzyskiwany wynik optymalizacji).

Dla każdego procesu i można określić zbiór W_i wariantów działań, których celem jest skrócenie realizacji przedsięwzięcia. Zbiory te ujmują również bazowe (ustalone pierwotnie) sposoby wykonania procesów. Wybór wariantów będzie modelowany za pomocą zmiennej binarnej $x_{i,j,w} \in \{0, 1\}$. Zmienna $x_{i,j,w}$ przyjmie wartość 1, jeżeli proces rodzaju i na działce j będzie realizowany wariantem $w \in W_i$, a wartość 0 – w przeciwnym przypadku. Na podstawie danych o pracochłonności robót na działkach roboczych, wydajnościach brygad i maszyn, nakładach rzeczowych oraz cenach czynników produkcji, można określić czas $t_{i,j,w}$ oraz koszt $k_{i,j,w}$ wykonania procesu rodzaju i na działce j dla każdego wariantu $w \in W_i$. W przypadku gdy dany proces nie jest realizowany na określonej działce, przyjmujemy odpowiedni czas i koszt równe zero (dla wszystkich wariantów). Zmienną określającą czas wykonania robót przez brygadę i na działce j oznaczymy jako $t_{i,j}$.

Optymalne warianty działań (organizacji wykonania procesów na działkach) oraz terminy $s_{i,j}$ rozpoczynania procesów $i \in I$ na działkach $j \in J$ przy ustalonym terminie dyrektywnym T zakończenia przedsięwzięcia można wyznaczyć, rozwiązując model matematyczny następującej postaci:

$$\min z: \quad z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{w \in W_i} k_{i,j,w} \cdot x_{i,j,w}, \tag{1}$$

$$s_{1,j} = 0, \quad j : c_{1,j} = 1, \tag{2}$$

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

$$s_{i,j} + t_{i,j} \le T, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \tag{4}$$

$$s_{b,j} - s_{a,j} \ge f_{a,b}, \quad \forall (a,b) \in A_j \text{ i o takim samym postępie robót, } \forall j \in J, \tag{5}$$

$$s_{b,j} + t_{b,j} - s_{a,j} - t_{a,j} \ge f_{a,b}, \quad \forall (a,b) \in A_j \text{ i o takim samym postępie robót, } \forall j \in J, \tag{6}$$

$$s_{b,j} - s_{a,j} - t_{a,j} \ge f_{a,b}, \quad \forall (a,b) \in A_j \text{ i o przeciwnym postępie robót, } \forall j \in J, \tag{7}$$

$$s_{i,l} = s_{i,k} + t_{i,k}, \quad \forall i \in I, \ \forall (k,l) : k,l \in J \wedge c_{i,l} = c_{i,k} + 1, \tag{8}$$

$$\sum_{w \in W_i} x_{i,j,w} = 1, \quad \forall i \in I, \ \forall j \in J, \tag{9}$$

$$x_{i,j,w} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \ \forall j \in J, \forall w \in W_i, \tag{10}$$

$$s_{i,j} \ge 0, \quad \forall i \in I, \ \forall j \in J. \tag{11}$$

Funkcja celu (1) minimalizuje łączny koszt realizacji przedsięwzięcia (przy ustalonym terminie dyrektywnym jego zakończenia). W terminie 0 rozpoczyna się realizacja procesu pierwszego rodzaju na pierwszej działce, na której będzie on wykonywany – zależność (2). Według zależności (3) jest obliczany czas realizacji każdego procesu na każdej działce. Zakończenie przedsięwzięcia musi nastąpić przed upływem terminu dyrektywnego – zgodnie z nierównością (4). Terminy rozpoczęcia pozostałych procesów są ustalane na podstawie zależności

(5)-(8), z uwzględnieniem kolejności technologicznej wykonania procesów (zadanej grafem *G*), ustalonego postępu robót na działkach i dopuszczalnych opóźnień w rozpoczynaniu procesów powiązanych relacjami bezpośredniego poprzedzania oraz z uwzględnieniem kolejności zajmowania działek przez jednostki organizacyjne (zadanej w postaci permutacji $\pi_i(j)$ dla każdego procesu *i*). Spełnienie warunku (8) zapewnia ciągłość pracy jednostek organizacyjnych – każda brygada rozpoczyna pracę na kolejnej działce bezpośrednio po zakończeniu procesu na działce poprzedniej (zgodnie z przyjętą permutacją działek). Dla każdego procesu na działce musi być dokonany wybór dokładnie jednego wariantu działań – równanie (9). Zmienne modelu muszą spełnić warunki brzegowe (10) i (11).

W celu uwzględnienia w modelu procesów skupionych i powierzchniowych, należy uzupełnić warunki (2)-(9) o dodatkowe ograniczenia.

Jeżeli proces skupiony *v* ma być zrealizowany w czasie t_v po rozpoczęciu procesu *u,* a przed rozpoczęciem procesu *t* na granicy działek *g* i *h*, wówczas termin jego rozpoczęcia powinien spełnić następujące nierówności:

$$s_v - \max\{s_{u,h}, s_{u,g}\} \geq f_{u,v}, \tag{12}$$

$$s_{t,h} - s_v - t_v \geq f_{u,v}, \text{ gdy } t \text{ jest realizowany od początku działki } h, \tag{13}$$

$$s_{t,g} - s_v - t_v \geq f_{u,v}, \text{ gdy } t \text{ jest realizowany od końca działki } g, \tag{14}$$

$$t_v = \sum_{w \in W_v} t_{v,w} \cdot x_{v,w}, \tag{15}$$

gdzie:

$t_{v,w}$ – czas realizacji procesu *v* przy zastosowaniu wariantu *w*,

$x_{v,w}$ – zmienna binarna modelująca decyzję o wyborze wariantu działań dla procesu *v*.

W przypadku procesów powierzchniowych (realizowanych przez pewien okres na jednej lub kilku działkach równocześnie) podobne zależności należy wprowadzić dla miejsc (lokalizacji) granic tych działek.

3. Przykład

W tab. 1 zestawiono dane o kolejności procesów jeszcze niezrealizowanych na czterech działkach (sekcjach) przykładowego obiektu liniowego, niezbędne do budowy grafu modelującego przedsięwzięcie.

Procesy na działkach są realizowane zgodnie z kilometrażem – wyjątek stanowi proces 3, którego wykonanie rozpoczyna się w miejscu zakończenia sekcji 4, a kończy na początku sekcji 3 (zgodnie z permutacją podaną w tab. 1).

Tabela 1. Kolejność realizacji procesów powtarzalnych (przykład)

Proces a	Numer procesu bezpośrednio poprzedzającego b	$f_{a,b}$	Permutacja działek $\pi_a(j)=c_{a,j}$			
			j=1	j=2	j=3	j=4
1	—	—	1	2	3	4
2	1	5	1	2	(3)	(4)
3	1	5	(4)	(3)	2	1
4	2	10	1	2	3	4
	3	10	1	2	3	4
5	4	5	1	2	3	4

Na granicy działek 2 i 3 będzie realizowany proces skupiony 6 (np. przeprawa mostowa) w czasie 10 dni przez podwykonawcę (czas ten, ze względu na wcześniej zawarty kontrakt, nie może być skrócony). Jego wykonywanie może rozpocząć się bezpośrednio po zakończeniu procesu 2 i musi zakończyć się przed wykonaniem procesu 3. W tab. 2 i 3 przedstawiono dane o czasach i kosztach wykonania poszczególnych procesów na działkach dla wariantu bazowego oraz dwóch rozważanych wariantów działań, zidentyfikowanych w celu skrócenia czasu realizacji przedsięwzięcia z 66 (rys. 4) do 55 dni.

Tabela 2. Czasy $t_{i,j,w}$ wykonania procesów na poszczególnych działkach dla analizowanych wariantów działań (przykład) [dni]

i	Wariant bazowy w=1				Praca w nadgodzinach w=2				Alokacja dodatkowych zasobów w=3			
	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4
1	5	7	5	5	4	6	4	4	3	5	3	3
2	4	5	0	0	3	4	0	0	2	3	0	0
3	0	0	4	4	0	0	3	3	0	0	2	2
4	8	10	8	8	6	8	6	6	7	8	7	7
5	6	8	6	6	5	7	5	5	4	6	4	4

Tabela 3. Koszty $k_{i,j,w}$ wykonania procesów na poszczególnych działkach dla analizowanych wariantów działań (przykład) [j. pieniężne]

i	Wariant bazowy w=1				Praca w nadgodzinach w=2				Alokacja dodatkowych zasobów w=3			
	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4	j=1	j=2	j=3	j=4
1	10	14	10	10	11	15	11	11	12	16	12	12
2	12	13	0	0	13	15	0	0	15	16	0	0
3	0	0	12	12	0	0	13	13	0	0	15	15
4	20	24	20	20	22	28	22	22	24	31	24	24
5	12	15	12	12	13	16	13	13	16	19	16	16

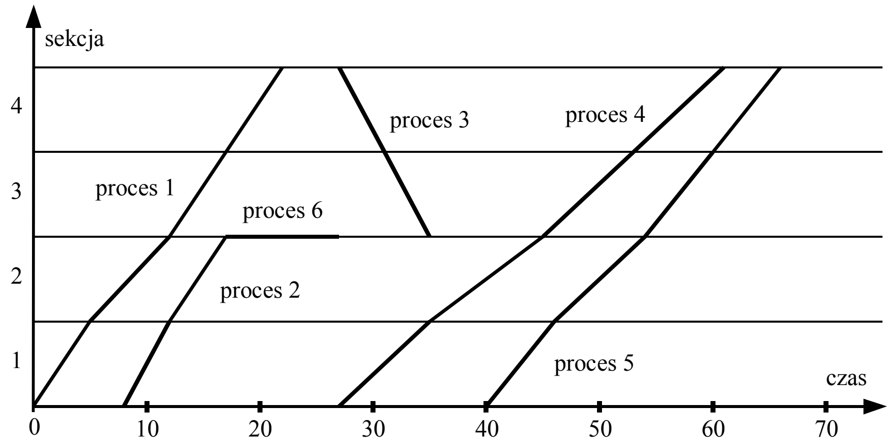
Model matematyczny problemu w przykładzie rozwiązano, stosując program Lingo 14.0. W rozwiązaniu optymalnym (tab. 4) uzyskano minimalny koszt realizacji przedsięwzięcia, równy 239 j.p. (11 j.p. więcej niż w wariancie bazowym).

Proces 1 powinien być na wszystkich działkach realizowany przy zastosowaniu wariantu 3 – z alokacją dodatkowych zasobów. Praca na działce 4 przy wykonywaniu procesów 3 i 4 powinna być realizowana na wydłużonej zmianie roboczej. Optymalny harmonogram realizacji przedsięwzięcia przedstawiono na rys. 5.

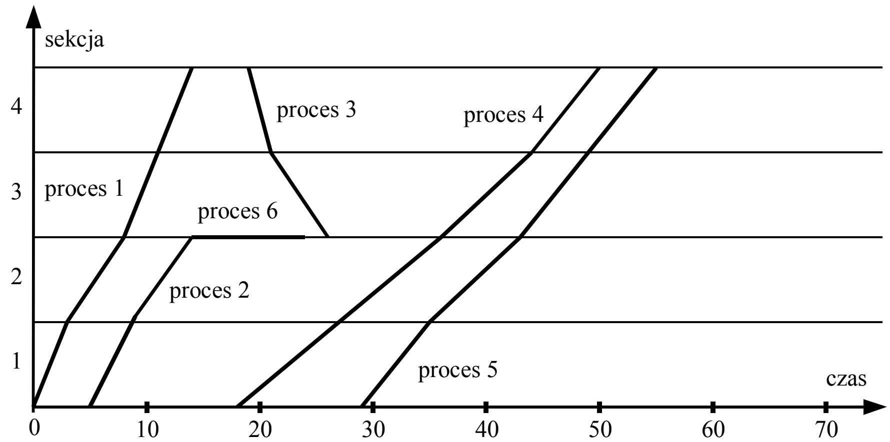
Tabela 4. Wartości zmiennych decyzyjnych w rozwiązaniu optymalnym (pominięto zmienne binarne z wartością 0)

Zmienna	Wartość	Zmienna	Wartość	Zmienna	Wartość
z	239	$t_{1,1}$	3	$s_{1,1}$	0
$x_{2,1,1}$	1	$t_{1,2}$	5	$s_{1,2}$	3
$x_{2,2,1}$	1	$t_{1,3}$	3	$s_{1,3}$	8
$x_{2,3,1}$	1	$t_{1,4}$	4	$s_{1,4}$	11
$x_{2,4,1}$	1	$t_{2,1}$	4	$s_{2,1}$	5
$x_{3,1,1}$	1	$t_{2,2}$	5	$s_{2,2}$	9
$x_{3,2,1}$	1	$t_{2,3}$	0	$s_{2,3}$	14
$x_{3,3,1}$	1	$t_{2,4}$	0	$s_{2,4}$	14
$x_{3,4,1}$	1	$t_{3,1}$	0	$s_{3,1}$	28
$x_{4,1,1}$	1	$t_{3,2}$	0	$s_{3,2}$	28
$x_{4,2,1}$	1	$t_{3,3}$	4	$s_{3,3}$	24
$x_{5,1,1}$	1	$t_{3,4}$	4	$s_{3,4}$	20
$x_{5,2,1}$	1	$t_{4,1}$	8	$s_{4,1}$	20
$x_{5,3,1}$	1	$t_{4,2}$	10	$s_{4,2}$	28
$x_{5,4,1}$	1	t_{43}	6	$s_{4,3}$	38
$x_{1,4,2}$	1	t_{44}	6	$s_{4,4}$	44
$x_{4,3,2}$	1	t_{51}	6	$s_{5,1}$	29
$x_{4,4,2}$	1	t_{52}	8	$s_{5,2}$	35
$x_{1,1,3}$	1	t_{53}	6	$s_{5,3}$	43
$x_{1,2,3}$	1	t_{54}	6	$s_{5,4}$	49
$x_{1,3,3}$	1	t_6	10	s_6	14

Należy zauważyć, że procesy 4 i 5 realizowane na działkach 1 i 2, jako niekrytyczne fragmenty ciągów, mogą być realizowane w czasie dłuższym niż w wariancie bazowym, dzięki czemu można zredukować koszty realizacji przedsięwzięcia. Z tego względu takie warianty działań trzeba również uwzględniać w przeprowadzanych analizach.



Rys. 4. Harmonogram realizacji przedsięwzięcia w przykładzie (wariant bazowy; czas realizacji – 66 dni)



Rys. 5. Optymalny harmonogram realizacji przedsięwzięcia w przykładzie (czas realizacji – 55 dni)

Podsumowanie

Specyfika realizacji budowlanych obiektów liniowych, a w szczególności dążenie do zapewnienia ciągłości pracy brygad realizujących procesy w kolejnych lokalizacjach, wymusza stosowanie odmiennych metod harmonogramowania, niż stosowanych w przypadku obiektów kubaturowych (np. klasyczna metoda *CPM* nie pozwala na optymalizację pracy zasobów i uwzględnienie ich dostępności). Ich celem jest zapewnienie najlepszych efektów harmonizacji pracy zasobów w postaci redukcji kosztów przestojów oraz przerzutów sił i środków, a także równomiernego oraz pełnego wykorzystania zdolności produkcyjnej brygad i maszyn. W porównaniu do budowy obiektów kubaturowych, przedsięwzięcia liniowe obejmują swoim zakresem z reguły mniejszą liczbę procesów, co przyczynia się do zmniejszenia złożoności problemów harmonogramowania oraz umożliwia stosowanie dokładnych algorytmów optymalizacyjnych do rozwiązywania ich modeli matematycznych. Oba rodzaje przedsięwzięć w jednakowym stopniu są narażone na negatywne skutki oddziaływania czynników ryzyka, charakterystycznych dla produkcji budowlanej. W szczególności warunki atmosferyczne, awaryjność maszyn, nierozpoznane warunki gruntowe itp. mogą być źródłem opóźnień realizacyjnych. W artykule zaproponowano model zagadnienia doboru optymalnych działań, których celem jest skrócenie czasu realizacji przedsięwzięcia i aktualizacja terminów wykonania zadań. Model ten – opracowany dla problemów praktycznych – może być rozwiązany za pomocą istniejących algorytmów programowania liniowego mieszanego i dostępnych programów komputerowych (solverów).

Literatura

Bakry I., Moselhi O., Zayed T. (2014), *Optimized Acceleration of Repetitive Construction Projects*, „Automation in Construction”, No. 39.

El-Rayes K., Moselhi O. (1998), *Resource-driven Scheduling of Repetitive Activities*, „Construction Management and Economics”, No. 16(4).

Georgy M.E. (2008), Evalutionary *Resource Schedule for Linear Project*, „Automation in Vonstruction”, No. 17.

Harmelink D.J, Rowings J.E. (1998), *Linear Scheduling Model: Development of Controlling Activity Path*, „Journal of Construction Engineering and Management”, No. 4(124).

Harris R.B., Ioannou P.G. (1998), *Scheduling Projects with Repeating Activities*, „Journal of Construction Engineering and Management”, No. 4(124).

Hassanein A., Moselhi O. (2005), *Accelerating Linear Projects*, „Construction Management and Economics", No. 23.

Lutz J.D., Hijazi A. (1993), *Planning Repetitive Construction: Current Practice*, „Construction Management and Economics", No. 11.

Mattila K.G., Abraham D.M. (1998), *Resource Leveling of Linear Schedules Using Integer Linear Programming*, „Journal of Construction Engineering and Management", No. 3(124).

Moselhi O., Hassanein A. (2003), *Optimized Scheduling of Linear Projects*, „Journal of Construction Engineering and Management", No. 129(6).

Russell A.D., Wong W.C.M. (1993), *New Generation of Planning Structures*, „Journal of Construction Engineering and Management", No. 119(2).

METHOD FOR REDUCTION OF CONSTRUCTION LINEAR PROJECTS DURATION

Summary: Construction projects often involve repetitive processes conducted in similar units. The project's scope is divided into simple processes to be conducted by particular gangs of specialized workers or machine sets. Schedules of such projects are usually presented graphically by two dimension coordinate system diagram. The main objective of schedule optimization is a project duration minimization. As the project proceeds, works may occur to be conducted not in accordance with the schedule, making the expected completion date seriously different from the as-planned date. In such cases, works need to be rescheduled, which usually means that durations of operations need also to be reduced. This can be achieved by working overtime, employing new resources or relocating resources from less important to critical tasks. The paper investigates into the problem of selecting duration reducing measures for a linear project minimizing cost of these measures. The authors put forward a mathematical model of the problem and illustrate its principle of operation with an example.

Keywords: planning linear projects, schedule optimization, linear programming.