

# OCENA HARMONOGRAMU REALIZACJI OBIEKTU BUDOWLANEGO

dr inż. Tomasz Wojtkiewicz

## 1. Wstęp

Doświadczenia z budowy obiektów infrastruktury, modernizacji sieci kolejowej, z budowy stadionów, wielkich obiektów handlowych, wysokich budynków biurowych i mieszkalnych wskazują na potrzebę stosowania wielokryterialnej oceny harmonogramów w celu ustalenia harmonogramu optymalnego lub grupy harmonogramów o cechach zbliżonych. Kryterium wyboru optymalnego wariantu realizacji przedsięwzięcia niekoniecznie musi być koszt lub czas. Może nim być także efektywne wykorzystanie środków technicznych, równomierność wykorzystania środków finansowych (przy zadanych ograniczenia np. ich dostępności).

Skonstruowanie narzędzi umożliwiających realizację powyższego postulat w sposób umożliwiający praktyczne wspomaganie decyzji przy opracowywaniu harmonogramów w budownictwie jest niezwykle istotne dla efektywnej gospodarki. Model matematyczny w postaci przygotowanej do obliczeń komputerowych został sformułowany w sposób pozwalający na wyrażenie go w programie w postaci wartości parametrów bądź charakterystyk, a także warunków i ograniczeń.

W modelowaniu, obok modelu struktury procesu reprezentowanego siecią, którą opisuje graf, istotne są elementy tego grafu, które z kolei odwzorowują operacje technologiczne. W procesie harmonogramowania podstawową informacją wejścia są następstwa technologiczne operacji, co wprowadza wiele możliwych struktur sieci wiążących operacje, oraz charakterystyki sposobów wykonania tych operacji, których zazwyczaj jest kilka (3-10) dla każdej z operacji.

## 2. Podstawowe definicje

**Harmonogram** to najogólniej zaplanowany rozkład zadań w czasie. Do jego sporządzenia należy określić zbiór tych zadań, ich kolejność wykonania (zależności międzyzadaniowe) oraz czas wykonywania każdego z nich. Do ich wykonania niezbędne są określone zasoby, najczęściej ograniczone. Termin *proces technologiczny* odnoszony jest do sekwencji elementarnych zmian zachodzących w czasie wraz z określeniem środków i warunków niezbędnych do osiągnięcia zamierzonego celu. *Przedsięwzięcie* definiuje się, jako zespół, powiązanych ze sobą procesów technologicznych wykonywanych w trakcie realizacji obiektu. Realizacja przedsięwzięcia jest związana z wykonywaniem procesów technologicznych w kolejności odpowiadającej przyjętej technologii. Częścią procesu technologicznego, organizacyjnie niepodzielną i jednorodną pod względem technologicznym jest *operacja technologiczna*. Wykonywana jest ona przez niezmiennie środki techniczne (zespół ludzi, maszyn i urządzeń, materiałów).

Operację technologiczną jako składnik przedsięwzięcia, charakteryzuje jej objętość. **Objętość operacji** jest to ilość pracy jaka musi być wykonana, aby operacja została w pełni zrealizowana. Miernik objętości każdej operacji zależy od rodzaju i charakteru wykonywanych czynności. Dobór środków technicznych do realizacji operacji technologicznych uwarunkowany jest ich objętością i złożonością. W przypadku operacji technologicznych składających się z wielu różnych czynności, konieczne jest określenie odpowiednich zestawów środków technicznych. Przez pojęcie **zestawów środków technicznych** rozumie się liczbę i rodzaj środków technicznych jednego lub kilku typów przeznaczonych do realizacji danej operacji technologicznej [5].

Ograniczona dostępność zasobów związana jest z przyjętym założeniem, że zbiór środków technicznych będących do dyspozycji przy realizacji danego przedsięwzięcia lub zadania inwestycyjnego jest zbiorem zamkniętym.

Przedstawione w artykule nowe podejście do oceny harmonogramów realizacji przedsięwzięć inwestycyjnych i sposób wyboru harmonogramu optymalnego polega na tym, że charakterystykę poszczególnych operacji technologicznych określa się przez dobór jednego z dostępnych środków technicznych. Praktycznym sposobem rozwiązania problemu oceny wielokryterialnej okazało się znalezienie najlepszego, czy najlepszych wariantów harmonogramów pod względem dwóch kryteriów (minimum kosztów i minimalny czas realizacji przedsięwzięcia), a następnie poszukiwanie optymalnego harmonogramu (najlepszej struktury grafu) spełniającego dodatkowe kryteria. Uzyskane rozwiązanie musi spełniać podstawowy warunek — ze względu na wszystkie cząstkowe funkcje celu nie może być gorsze niż każde inne dopuszczalne rozwiązanie. Harmonogram spełniający ten warunek można uznać za niezdominowany lub optymalny w sensie *Pareto* [3].

### 3. Model matematyczny harmonogramu – zadania decyzyjne

#### 3.1. Sieć operacji

Harmonogram to system (układ), którego elementami są różnorodne operacje wykonywane w określonej, nieprzypadkowej kolejności. Każda z nich rozpoczyna się w określonej chwili i w innej, także określonej chwili się kończy. Chwile te nazywamy zdarzeniami. Istnieje także możliwość wyboru sposobu wykonania operacji z przeliczalnego zbioru tych sposobów.

Wygodnym odwzorowaniem struktury opisanego wyżej układu jest graf  $G = \langle W, U \rangle$ , przy czym  $U$  jest zbiorem łuków grafu, które odwzorowują operacje, zaś  $W$  — zbiorem węzłów, które stanowią odwzorowania chwil czasu (zdarzeń) odpowiadających rozpoczęciu/zakończeniu operacji [3]. Oczywiście chwila zakończenia  $i$ -tej operacji tworzy możliwość rozpoczęcia kolejnej ( $i+1$ ) operacji.

$W$  stanowi przy tym zbiór wierzchołków sieci:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\},$$

zaś  $U$  — zbiór jej łuków:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}.$$

Harmonogram ze swej definicji ma strukturę sieciową. Wygodniej więc będzie harmonogram odwzorować jako sieć matematyczną stanowiącą trójkę:

$$C = \langle G, \Psi, \Phi \rangle$$

lub

$$C = \langle G, \{ \varphi_j \}, \{ \phi_i \} \rangle$$

gdzie:  $G$  oznacza graf struktury sieci  $G = \langle W, U \rangle$ ,  $\Psi$ ,  $\Phi$  — zbiory funkcji-charakterystyk przypisane odpowiednio do zbioru wierzchołków i zbioru łuków.

Zbiór  $\Psi$  składa się zazwyczaj ze zdarzeń opisanych etykietami:

$$\Psi = \{ \varphi_j, j = 1, 2, \dots, n \}$$

Na zbiór  $\Phi$ :

$$\Phi = \{ \phi_i, i = 1, 2, \dots, m \}$$

składają się natomiast charakterystyki operacji (etykieta nazwy operacji), które wskazują na macierze zawierające nazwy sposobów wykonania  $i$ -tej operacji, a dla każdego ze sposobów — charakterystykę ekonomiczną (koszt) i czas wykonania danej operacji, odpowiadające temu sposobowi. Przy tym:

$$\phi_i = \{ \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{o_i} \}, \varphi_j = \{ k_{ij}, \tau_{ij}, \dots \}$$

gdzie:  $o_i$  - oznacza liczbę alternatywnych sposobów wykonania  $i$ -tej operacji,  
 $s_{ij}$  - oznacza etykietę  $j$ -tego sposobu wykonania,  
 $k_{ij}$  i  $\tau_{ij}$  - wymagane nakłady i czas na wykonanie  $i$ -tej operacji  $j$ -tym sposobem, nazywane charakterystykami sposobu wykonania operacji.

Zbiory funkcji są nazywane modelami matematycznymi procesów lub charakterystykami elementów (operacji, sposobów wykonania operacji) odwzorowywanych odpowiednimi elementami grafu. Są one określone na zbiorach informacji wejściowej i decyzji.

Możliwe jest dodanie kolejnych charakterystyk związanych z danym sposobem realizacji operacji, które przykładowo opisywałyby uciążliwość danego sposobu dla środowiska, ryzyko związane ze sposobem wykonania operacji i wiele innych. Wartości takich charakterystyk mogą być ponadto liczbami rozmytymi, opisami statystycznymi (wartość oczekiwana, odchylenie standardowe) czy wreszcie wartościami trudnomierzalnymi i niemierzalnymi.

### 3.2. Model zadania optymalizacji

Zagadnienie wielokryterialne w przedstawionych rozważaniach ogranicza się do zagadnienia **dwukryterialnego**, z minimalizacją czasu i kosztu realizacji. Oczywiście można rozważać większą liczbę kryteriów, co w niewielkim stopniu zmieni postać funkcji celu, a dla czytelności prezentacji problemu ograniczymy się właśnie do zagadnienia dwukryterialnego. Warto jednak w tym miejscu zauważyć, że przy większej liczbie kryteriów funkcja celu nadal będzie liniową i ważoną.

Jednoczesna minimalizacja czasu i kosztu wykonania przedsięwzięcia, odpowiadającego jak najkrótszej i jak najtańszej jego realizacji implikuje liniowy model zagadnienia harmonogramowania.

Funkcja celu wyraża ważony wpływ czasu i kosztu realizacji przedsięwzięcia:

$$h = w_1 \cdot \frac{f}{T_{\max}} + w_2 \cdot \frac{g}{K_{\max}} \rightarrow \min \quad (1)$$

Ważenie wpływu obu kryteriów nie byłoby możliwe bez doprowadzenia obu kryteriów do stanu porównywalności. Osiągnięto to dzięki podzieleniu wartości funkcji celu przez maksymalną wartość, odpowiednio:

- czasu realizacji przedsięwzięcia, otrzymaną przy założeniu szeregowej realizacji operacji i zastosowaniu najbardziej czasochłonnych sposobów wykonania poszczególnych operacji:

$$T_{\max} = \sum_{i=1}^m \max_j \tau_{ij} .$$

- kosztu wykonania przedsięwzięcia odpowiadającego zastosowaniu najbardziej kosztownych sposobów realizacji poszczególnych operacji:

$$K_{\max} = \sum_{i=1}^m \max_j k_{ij} .$$

Wymagany formalnie dodatni charakter wartości  $T_{\max}$  i  $K_{\max}$  wynika bezpośrednio z dodatniego charakteru czasu i kosztu poszczególnych sposobów wykonania operacji składowych przedsięwzięcia.

W modelu brak jest również składników wynikających z ograniczania kosztu oraz czasu wykonania przedsięwzięcia. Brak potrzeby ich jawnego uwzględniania w modelu wynika z przyjętej postaci funkcji celu, realizującej kompromis między czasem a kosztem realizacji.

Należy zwrócić uwagę na to, że z formalnego punktu widzenia funkcja  $f$  zależy od struktury sieci operacji opisanej grafem  $\mathbf{G}$  wyrażonym odpowiednią macierzą incydencji  $\mathbf{D}$ , przydziału sposobów wykonania do operacji (wyrażonego macierzą zmiennych decyzyjnych  $\mathbf{x}$ ) oraz czasów realizacji odpowiadających poszczególnym sposobom wykonania operacji (wyrażonych macierzą  $\boldsymbol{\tau}$ ):

$$f = f(\mathbf{G}, \mathbf{x}, \boldsymbol{\tau}) .$$

Natomiast addytywność kosztów sprawia, że  $g$  nie jest funkcją struktury sieci. Zależy przy tym jedynie od przydziału sposobów wykonania operacjom oraz kosztów realizacji operacji poszczególnymi sposobami:

$$g = g(\mathbf{x}, \mathbf{k}) .$$

#### 4. Charakterystyka operacji realizacji przykładowego obiektu budowlanego (garaż wielopoziomowy na 500 stanowisk)

##### 4.1. Opis realizacji — następstwa operacji

Przedmiotem przykładu jest harmonogram budowy garażu wielopoziomowego na 500 stanowisk.

W celu uzyskania przejrzystych i łatwych do oceny wyników obliczeń operacje zostały zagregowane. Przyjęto, że realizacja przedmiotowego obiektu wymaga wykonania **dziesięciu operacji technologicznych o dużym stopniu agregacji**, oznaczanych od  $m(1)$  do  $m(10)$ . Ich opis wraz z podaniem list operacji bezpośrednio

poprzedzających poszczególne operacje oraz określeniem objętości przedstawiono w tablicy 1.

Tabelarycznie przedstawione są także aktualne operacje m(k) oraz poprzedniki i następniki, gdzie wyróżnione zostało bezpośrednie i pośrednie następstwo technologiczne. Znając następstwa technologiczne można skonstruować graf obrazujący realizację przedsięwzięcia przy pomocy dziesięciu operacji z uwzględnieniem jedynie następstw technologicznych. Linia przerywaną oznaczone są operacje pozorne.

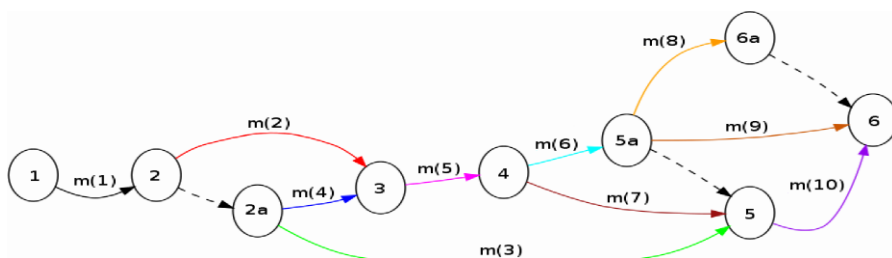
Każda operacja może być wykonana na wiele sposobów, czyli przy użyciu różnych środków technicznych. Przez środek techniczny należy rozumieć zespoły pracownicze, maszyny i urządzenia z obsługą, materiały budowlane, gotowe wyroby i urządzenia wbudowane do realizowanego obiektu. Zbiór zestawów środków technicznych jest zbiorem zamkniętym.

Przedstawione zarówno w tablicy 1 dane na temat następstwa operacji pozwalają zbudować **graf następstwa operacji** przedstawiony na rysunku 1. Łukami oznaczono na nim operacje, a węzłami — relacje następstwa łączące zależne od siebie operacje (zdarzenia).

**Tablica 1. Charakterystyka operacji przykładowego przedsięwzięcia**

Operacja	Opis	Poprzedniki	Objętość
m(1)	Zaplecze budowy	-	Kompletacja, załadunek, przewóz, wyładunek, montaż 6 kontenerów i uruchomienie wszystkich elementów zaplecza budowy: 5000 m <sup>2</sup>
m(2)	Przylącza infrastrukturalne	m(1)	stacja trafo, lokalna oczyszczalnia, stacja pomp. wod.
m(3)	Oświetlenie zewnętrzne	m(1)	12 słupów oświetleniowych, 500 m kabla zasil., centralka ster. automat. ośw.
m(4)	Roboty ziemne	m(1)	10000 m <sup>3</sup> ziemi przemieszczenie lokalne i wywiezienie częściowe na odległość do 30 km
m(5)	Mikropalowanie	m(2), m(4)	80 mikropali, 24 słupy nośne
m(6)	Konstrukcja budynku	m(5)	800 m <sup>3</sup> konstrukcji żelbetowej podziemnej, 320 ton konstrukcji stalowej naziemnej
m(7)	Drenaż	m(5)	300 m drenażu, 8 studzienek
m(8)	Roboty wykończeniowe	m(6)	120 m <sup>2</sup> ściany ceramicznej otynkowanej dwustronnie, 160 m <sup>2</sup> luksferów, 80 m <sup>2</sup> szyb podwójnych w stalowych ramach
m(9)	Płyty parkingowe	m(6)	800 m <sup>2</sup> zdylatowanych płyt podłogi przemysłowej z odstojnikami olejowymi
m(10)	Ogrodzenie i systemy kontroli dostępu	m(3), m(6), m(7)	300 m ogrodzenia wg projektu, 8 kamer, 400 m kabla, 2 monitory kontroli dostępu, aut. komputerowy system rejestracji

*Źródło: opracowanie własne*



Rys. 1. Graf następstw operacji przedsięwzięcia.

Źródło: opracowanie własne

Reprezentacją numeryczną tego grafu może być macierz bezpośrednich poprzedników. Jest to macierz kwadratowa  $n \times n$  gdzie  $n$  jest liczbą łuków reprezentujących operacje. Wierzchołki grafu — węzły sieci, reprezentują zdarzenia i relacje następstwa, łączące zależne od siebie operacje.

#### 4.2. Wymagane środki i możliwe sposoby wykonania operacji

Specyfika budownictwa powoduje, że poszczególne operacje technologiczne można wykonywać na szereg różnych sposobów. Zróżnicowanie sposobów wykonania operacji pociąga za sobą wykorzystanie różnych zasobów — zarówno pracy ludzkiej jak i sprzętu i materiałów (czyli środków technicznych  $s$ ).

Konsekwencją tego jest zróżnicowanie czasu i kosztu wykonania tej samej operacji technologicznej. Każdemu ze sposobów wykonania operacji można więc przyporządkować czas i koszt wykonania, odniesiony do wymaganej objętości operacji. Wybór sposobu realizacji poszczególnych operacji wpływa więc bezpośrednio na czas i koszt wykonania całego przedsięwzięcia, a także powoduje i inne skutki np. związane z intensywnością i równomiernością wykorzystania zasobów finansowych i środków technicznych, zaangażowanych w proces realizacji przedsięwzięcia.

Konieczna jest znajomość wartości odpowiednich charakterystyk poszczególnych sposobów realizacji operacji. Wykorzystuje się w tym celu dane na temat czasu  $\tau_{ij}$  i kosztu  $k_{ij}$  wykonania  $i$ -tej operacji  $j$ -tym możliwym sposobem.

Tablica 2. Czas i koszt wykonania operacji różnymi sposobami

Operacja	Charakt.	Wariant sposobu wykonania, $j$						Ekstrema	
		1	2	3	4	5	6	min	max
m(1)	Zestaw	s(1)	s(2)	s(3)	s(7)	s(14)	s(15)	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	48	54	40	40	60	32	32	60
	$k_{ij}$ [tys. zł]	56	60	38	32	58	60	32	60
m(2)	Zestaw	s(3)	s(4)	s(22)	s(23)	s(59)	s(60)	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	366	350	316	400	300	400	300	400
	$k_{ij}$ [tys. zł]	412	400	450	470	468	420	400	470
m(3)	Zestaw	s(22)	s(23)	s(24)	s(63)	-	-	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	450	500	500	400	-	-	400	500
	$k_{ij}$ [tys. zł]	420	410	420	430	-	-	410	430
m(4)	Zestaw	s(7)	s(8)	s(67)	s(68)	-	-	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	224	200	200	124	-	-	124	224
	$k_{ij}$ [tys. zł]	400	460	480	500	-	-	400	500
m(5)	Zestaw	s(9)	s(10)	s(13)	-	-	-	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	200	200	200	-	-	-	200	200
	$k_{ij}$ [tys. zł]	1700	1780	1800	-	-	-	1700	1800

Operacja	Charakt.	Wariant sposobu wykonania, <i>j</i>						Ekstrema	
		1	2	3	4	5	6	min	max
m(6)	Zestaw	s(20)	s(29)	<b>s(30)</b>	s(35)	<b>s(36)</b>	-	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	1000	850	<b>800</b>	900	900	-	800	1000
	$k_{ij}$ [tys. zł]	6700	6980	7000	7300	<b>7450</b>	-	6700	7450
m(7)	Zestaw	<b>s(3)</b>	s(4)	s(59)	<b>s(60)</b>	-	-	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	250	208	224	<b>200</b>	-	-	200	250
	$k_{ij}$ [tys. zł]	<b>240</b>	290	288	290	-	-	240	290
m(8)	Zestaw	<b>s(51)</b>	s(54)	<b>s(55)</b>	-	-	-	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	600	500	<b>400</b>	-	-	-	400	600
	$k_{ij}$ [tys. zł]	<b>1000</b>	1280	1520	-	-	-	1000	1520
m(9)	Zestaw	<b>s(35)</b>	s(37)	<b>s(38)</b>	-	-	-	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	200	200	<b>142</b>	-	-	-	142	200
	$k_{ij}$ [tys. zł]	<b>1200</b>	1260	1300	-	-	-	1200	1300
m(10)	Zestaw	<b>s(14)</b>	<b>s(22)</b>	<b>s(25)</b>	<b>s(28)</b>	-	-	-	-
	$\tau_{ij}$ [h]	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	-	-	100	100
	$k_{ij}$ [tys. zł]	750	<b>720</b>	730	800	-	-	720	800

Źródło: opracowanie własne – budowa wielopoziomowego garażu [10]

Do wykonania poszczególnych operacji można użyć około 30 różnych zestawów środków technicznych *s*. Kilkanaście zestawów zostało utworzonych dzięki wykorzystaniu połączenia prostszych zestawów. Mają więc one złożony, zagregowany charakter. Zestawy takie wyróżniono wytłuszczeniem czcionki. Wskazanie, którym zestawem środków technicznych dana operacja będzie wykonywana, pozwala na określenie charakterystyki tej operacji, czyli kosztu i czasu jej realizacji.

### 4.3. Algorytm obliczeń numerycznych

Obliczenia dotyczą określonych wcześniej postaci sieci operacji budowy garażu wielopoziomowego. Mając ustaloną postać sieci można przystąpić do przygotowania, a następnie wykonania obliczeń zgodnie z następującymi krokami:

- 1) Wybór postaci rozważanego zagadnienia optymalizacyjnego.
- 2) Określenie danych wejściowych — parametrów obliczeń.
- 3) Zakodowanie modelu w postaci zgodnej z wymogami oprogramowania użytego do rozwiązywania zagadnienia PL.
- 4) Wykonanie obliczeń i wygenerowanie raportu z rezultatami.
- 5) Analiza otrzymanych wyników.

Wybór właściwej postaci zagadnienia zależy do postawionego celu (kryterium lub kryteriów optymalizacji) oraz dostępnych danych. Przy określaniu danych wejściowych jest konieczne uwzględnienie wymagań oprogramowania zastosowanego do rozwiązania formułowanego modelu PL. Dotyczy to zwłaszcza konieczności dopasowania formy danych.

Do wykonania obliczeń zastosowano narzędzie *glpk* (ang. *GNU linear toolkit*), stanowiące połączenie biblioteki programistycznej z aplikacją rozwiązującą zagadnienia PL, dostępne bez ograniczeń poprzez Internet (<http://www.gnu.org/s/glpk/>).

### 4.4. Ranking rozwiązań sprawnych

W celu zrealizowania obliczeń przyjęto 15 charakterystycznych postaci sieci operacji, odpowiadających zróżnicowanym przebiegom przedsięwzięcia [10].

W tabelicy 3 pozycje 1 ÷ 8 wskazują sposoby wykonania przedsięwzięcia, dla których wartość funkcji celu (1) jest najmniejsza (sprawne zestawy wartości czasu i kosztów otrzymane w wyniku obliczeń). Postacie sieci operacji 10-14 zaproponowała grupa doświadczonych praktyków z dziedziny organizacji robót budowlanych. Natomiast postać nr 9 wybrano w celu zaprezentowania także najmniej korzystnej postaci sieci operacji. Postacie 10-15 można więc potraktować jako dobrane na podstawie doświadczenia i intuicji.

Na podstawie otrzymanych optymalnych (sprawnych w sensie *Pareto*) wartości funkcji celu  $h$  można zbudować ranking postaci przebiegów (harmonogramów) przedsięwzięcia, wyrażonych poszczególnymi formami sieci 1-15.

Ranking przedstawiono w tabelicy 3.

**Tablica 3. Ranking sposobów wykonania przedsięwzięcia**

Pozycja	1-4	5-7	8	9	10	11-12	13-14	15
$h$	0,795	0,801	0,803	0,820	0,838	0,847	0,855	0,890
sieć	1,3,5,7	2,4,6	15	8	10	11,14	12,13	9

Źródło: opracowanie własne [10]

Dzięki powyższemu rankingowi można dokonać redukcji liczby przebiegów przedsięwzięcia do porównań parami z uwagi na pozostałe kryteria. Z uwagi na zbliżone wartości funkcji celu do szczegółowej analizy wielokryterialnej zakwalifikowano wstępnie harmonogramy przedsięwzięcia: poz. 1-8. Ostatecznie do porównań parami zakwalifikowano 7 pierwszych postaci, które odpowiadają sprawnej, w sensie czasu i kosztu realizacji przedsięwzięcia. O odrzuceniu ósmej postaci zdecydował fakt jej zdominowania przez pozostałe wstępnie wybrane postacie. Wariant 9 to przykład szeregowego wykonywania operacji, co dało w efekcie najdłuższy ich sumaryczny czas 2906 godz. i koszt 13340 tys. zł [10].

Interesujące jest także to, że warianty 10-15 zaproponowane przez ekspertów budowlanych od organizacji zarządzania osiągały dużo gorsze wartości funkcji celu, co przekładało się zarówno na większe nakłady finansowe jak i wydłużało czas realizacji inwestycji przy użyciu tych wariantów, w porównaniu do rozwiązań sprawnych globalnie i w jego bliskim otoczeniu.

#### **4.5. Inne kryteria mogące wpływać na wybór najlepszego harmonogramu**

Obserwując siedem wyselekcjonowanych rozwiązań sprawnych, zauważamy że zarówno struktura sieci jak i kolejność realizacji zawsze 10 operacji są różne. Różnice te ujawniają się zarówno poprzez liczbę węzłów w grafie, jak i liczbę operacji wykonywanych równolegle. Operacje te tworzą tzw. pęczki operacji, a grafy opisujące strukturę takich harmonogramów są nazywane grafami pęczkowymi.

Bez wątplenia, korzystając z tych właśnie cech należałoby szukać rozwiązania najlepszego wśród wyróżnionych. Jedną z sensownych zdaniem wielu badaczy charakterystyk grafu sieci wykorzystuje właśnie występowanie pęczków operacji, gdyż zazwyczaj czas trwania operacji realizowanych równolegle nie jest sobie równy. Różnice czasu realizacji odnoszone do czasu trwania operacji najdłuższej w pęczku określa tzw. luz czasowy.



Oczywiście suma takich luzów stanowi już wskaźnik. Zakłada się przy tym, że im wskaźnik ten ma większą wartość tym gorzej dla jakości rozwiązania. Autorzy artykułu nie podzielają tego poglądu uważając, że myślenie takie może mieć sens w odniesieniu do struktur losowych, przypadkowych. Inaczej jest jednak w przypadku harmonogramu sprawnego. Czyż bowiem większy luz czasu nie jest sytuacja korzystną? Dysponując tym zasobem można zadbać o jakość rozwiązania a także przeciwstawić się zdarzeniom w otoczeniu realizacji inwestycji o charakterze losowym (pogorszenie warunków pogodowych, opóźnienie dostaw materiału itp.).

Drugi wskaźnik pojawia się w wyniku analizy współpracy wykonawcy z bankami. Doświadczenie pokazuje, że niższe koszty finansowania dotyczą możliwie równomiernego przepływu środków i produktów finansowych. Przeciwnie, niewielkie przepływy pieniądza w pewnych okresach budowy i z kolei gwałtowny wzrost zapotrzebowania na środki finansowe w innych, pogarsza warunki finansowania inwestycji i tym samym wzrasta koszt pozyskania pieniądza.

Ostatecznie do dalszych badań przyjęto dwa wskaźniki

- wielkość luzów czasu operacji przedsięwzięcia,
- wartość miary zróżnicowania zapotrzebowania na środki finansowe w trakcie realizacji przedsięwzięcia (miary równomierności zapotrzebowania).

Pierwszy z nich stanowi sumę wszystkich luzów czasowych występujących w pęczkach. Odpowiada mu suma różnic czasu wystąpienia zdarzeń kończących poszczególne operacje oraz długości operacji wynikającej z wyboru  $j$ -tego, możliwego sposobu jej wykonania, oznaczona jako  $L$ :

$$L = \sum_{i=1}^m \left[ (t_i^{(k)} - t_i^{(p)}) - \sum_{j=1}^{o_i} x_{ij} \cdot \tau_{ij} \right],$$

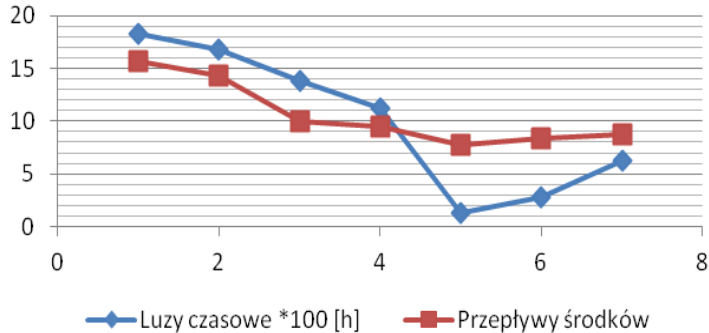
gdzie:  $t_i^{(p)}$  i  $t_i^{(k)}$  oznaczają odpowiednio czasy zaistnienia początkowego i końcowego zdarzenia  $i$ -tej operacji.

Drugi natomiast obliczany jest jako suma kwadratów różnic pomiędzy średnim przepływem środków w czasie całej inwestycji  $K/T$  a przepływami w czasie jej realizacji, głównie między węzłami, z uwzględnieniem luzów czasowych. Stanowi ją więc ważona czasem suma kwadratów odchyłek aktualnego zapotrzebowania na środki finansowe od średniego zapotrzebowania w trakcie realizacji przedsięwzięcia.

$$\Delta K = \sum_{k=1}^u \left[ \Delta \tau_k \cdot \sum_{i=1}^m \left( \chi_{ik} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{o_i} x_{ij} k_{ij}}{\sum_{j=1}^{o_i} x_{ij} \tau_{ij}} \right) - \frac{\bar{K}}{\bar{T}} \right]^2$$

Warto zwrócić uwagę na wyraźne skorelowanie wartości obu wskaźników, co ilustruje rysunek 2. Wzrost wartości wskaźnika luzów czasowych odpowiada także wzrostowi wskaźnika równomierności przepływów finansowych. Można domniemywać, że luzy czasowe kosztują, co właśnie odpowiada wzrostowi drugiego wskaźnika. Domyślamy się więc już na tym etapie postępowania, że szczególnie interesujące będą rozwiązania charakteryzujące się jednocześnie niską wartością wskaźnika nierównomierności i możliwie wysoką luzów czasowych. Oczywiście,

gdyby przyjąć, że również luzy czasowe powinny być minimalne, rozwiązaniem naszego problemu byłby harmonogram odpowiadający pozycji nr 5, kolejnymi zaś 6, 7 i 3 itd. (tab. 3). Sugerując, że warto dysponować luzami czasu, poszukiwać będziemy kolejnego kompromisu między tymi dwoma kryteriami.



Rys. 2. Wartości kryteriów pomocniczych dla badanych 7 wariantów.

Źródło: opracowanie własne

## 5. Wnioski

- Wspomaganie tworzenia harmonogramu poprzez zastosowanie proponowanych w rozprawie [10] metod oraz efektywny przegląd wielu dopuszczalnych wariantów sieci jest źródłem znaczących korzyści finansowych i oszczędności czasu.
- Optymalizacja dwukryterialna harmonogramu realizuje naturalny kompromis między wielkościami nakładów a czasem realizacji inwestycji, co osłabia konflikty między poszczególnymi operacjami o dostępne zasoby.
- Wskaźnik równomiernego zużycia środków finansowych stanowi dobre przybliżenie rozwiązania sprawnego o wartościowej strukturze grafu.

Przedstawiona metoda była wielokrotnie wykorzystywana przez autora do oceny harmonogramów dużych przedsięwzięć inwestycyjnych w ramach opinii i ekspertyz wykonywanych w WACETOB Sp. z o.o. Podstawowym wnioskiem zawsze jest to, że dobre planowanie realizacji obiektu budowlanego pozwala ona uzyskanie dużych oszczędności przy zachowaniu wymagań jakościowych.

Odpowiedź na pytanie „Czy wspomaganie harmonogramu w budownictwie metodami wielokryterialnych ocen ma sens?” zawsze będzie pozytywna. W praktyce inwestycyjnej bywa i tak, że ze względu na brak wiedzy i narzędzi pełen harmonogram w ogóle nie powstaje. Rozwiązania uzyskiwane w wyniku „improwizacji” okazują się wówczas bardzo drogie dla inwestora i budowane obiekty są oddawane do użytku z wielomiesięcznymi opóźnieniami.

## Literatura:

- [1] Adamiecki K. (1985), O nauce organizacji, PWE, Warszawa.

- [2] Ackoff R.W. (1968), *Decyzje optymalne w badaniach stosowanych*. PWN, Warszawa.
- [3] Ambroziak T. (2007), *Metody i narzędzia harmonogramowania w transporcie*. PIB, Warszawa.
- [4] Ameljańczyk A. (1978), Rozwiązania dominujące i niezdominowane zadań optymalizacji wielokryterialnej. *Przegląd Statystyczny*, t. 25, z. 3.
- [5] Biliński T., Czachorowski J. (2001), *Organizacja procesów inwestycyjno-budowlanych*. IPB. Warszawa.
- [6] Dytczak M. (2010), *Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie*. OW Politechnika Opolska, Opole.
- [7] Dytczak M., Ginda G., Wojtkiewicz T. (2011b), Identyfikacja globalnie optymalnego przebiegu złożonych inwestycji, *Zeszyty Naukowe WSB*, nr 20, 2011b, s. 137–156.
- [8] Saaty T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill, New York.
- [9] Wojtkiewicz T. (2011), Intangibility-aware Evaluation of Construction Project Schedules, w: De Felice F., Esposito E., Petrillo A., Saaty T.L. (Eds.), *ISAHP 2011. Abstracts of the proceedings*, Sorrento, Naples, Italy, 15–18 June 2011, s. 134 (paper no.ISAHP\_0152, na nośniku elektronicznym).
- [10] Wojtkiewicz T. (2012), *Wielokryterialna Metoda Oceny Harmonogramu w Budownictwie – rozprawa doktorska*, Politechnika Opolska, Opole.