

OPTIMALIZACJA PRZEBIEGU ZŁOŻONYCH PRZEDSIĘWZIĘĆ BUDOWLANYCH

Mirosław DYTCZAK, Grzegorz GINDA, Tomasz WOJTKIEWICZ

Streszczenie: Realizacja przedsięwzięć budowlanych obejmuje predefiniowane zestawy operacji, powiązanych zależnościami następstwa technologicznego. Relacje następstwa stwarzają liczne możliwości uporządkowywania operacji w czasie. Każdą z operacji można przy tym wykonać wykorzystując warianty sposobów jej realizacji. Każdy z tych sposobów jest jednoznacznie definiowany przez wykorzystywany zestaw środków technicznych. Ze składu zaangażowanego zestawu wynikają charakterystyki operacji np. czas i koszt realizacji, które w rezultacie przekładają się na charakterystyki przebiegu realizacji całego przedsięwzięcia. Należy przy tym także uwzględnić ograniczenia zasobowe i realizację różnych, konfliktowych celów. Poszukiwanie optymalnego harmonogramu przedsięwzięcia jest więc trudnym zagadnieniem.

Słowa kluczowe: budownictwo, przedsięwzięcie, realizacja, wielowariantowa operacja technologiczna, harmonogram, model, graf technologiczny, optymalizacja globalna.

1. Wstęp

Realizacja przedsięwzięć budowlanych prowadzi do otrzymania specyficznych rezultatów w formie obiektów lub robót. Uzyskanie zamierzonego efektu wymaga wykonania szeregu operacji technologicznych. Ich kolejność nie jest przypadkowa, gdyż wykonanie kolejnych operacji jest uwarunkowane wynikami wcześniejszych, poprzedzających je operacji technologicznych. Wyjątkiem są operacje początkowe, nie wymagające wcześniejszego wykonania innych operacji. Specyfika produkcji budowlanej wynika także z możliwości wykonania poszczególnych operacji na szereg różnych sposobów, wariantów wykonania. Różnią się one między sobą postaciami wykorzystywanych zestawów środków technicznych. Użyty do wykonania operacji zestaw środków technicznych jednoznacznie określa jej charakterystyki, związane z kosztem i czasem realizacji. Tradycyjnie używane było pojedyncze kryterium związane z czasem lub kosztem wykonania przedsięwzięcia. Obecnie podejmowane są próby stosowania większej liczby kryteriów, które dodatkowo są ze sobą łączone. Ponadto, przy wykonywaniu przedsięwzięć mogą być uwzględniane kryteria odnoszące się nie tylko do charakterystyk całego przedsięwzięcia, ale także pojedynczych operacji. Przykładowo, w pracy [1] wymieniono następujące (zwykle minimalizowane), dodatkowe kryteria związane z przedsięwzięciem jako całością np. równomierności wykorzystania środków technicznych lub finansowych. Natomiast w odniesieniu do poszczególnych operacji wykorzystywane są kryteria chwilowej intensywności nakładów finansowych, pracochłonności stosowanych środków technicznych, intensywności zużycia zasobów materialnych, chwilowej liczby zaangażowanych środków technicznych itd.

Uporządkowanie operacji technologicznych musi spełniać warunki wymaganej kolejności ich wykonania. Rezultatem konieczności zachowania następstwa operacji jest

jednak na ogół nie jedno ale wiele dopuszczalnych uporządkowań operacji, które w dodatku można wykonywać różnymi sposobami. Komplikuje to znacząco identyfikację optymalnego przebiegu przedsięwzięcia.

Mając na uwadze powyższe trudności w pracy, zarysowano algorytm prowadzący do identyfikacji (lub przybliżenia) najlepszego wariantu przebiegu realizacji przedsięwzięcia przy uwzględnieniu różnych kryteriów i ograniczonej dostępności zasobów.

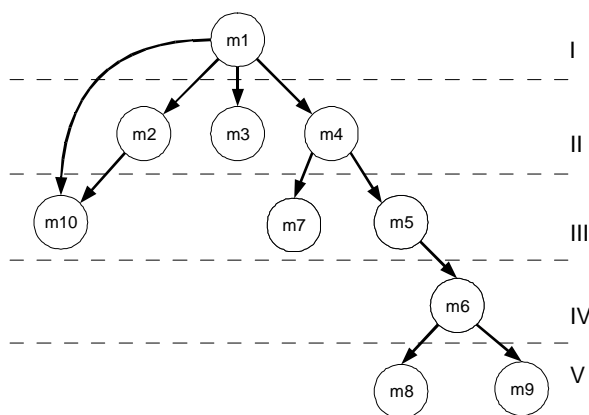
2. Model przebiegu przedsięwzięcia

Do opisu przebiegu realizacji przedsięwzięcia użyto modelu sieciowego $S(G, \Psi, \Phi)$, gdzie Ψ i Φ są zbiorami funkcji (charakterystyk) przypisanych odpowiednio do łuków i wierzchołków grafu G . Posłużono się przy tym acyklicznym i asymetrycznym grafem skierowanym o łukach E odwzorowujących operacje technologiczne oraz wierzchołkach V wyrażających momenty początków i końców operacji. Graf taki nazywany jest *technologicznym grafem przedsięwzięcia* [1]. Do każdego łuku grafu przypisana jest macierz, której wiersze opisują wartości cech (charakterystyk) danego sposobu wykonania operacji. Wymagania dotyczące technologicznej kolejności operacji opisane są acyklicznym i niesymetrycznym grafem skierowanym, nazywanym *grafem następstwa operacji* G_n . Jego wierzchołki odpowiadają operacjom, a zwrot łuków wskazuje na kierunek relacji bezpośredniego następstwa.

W tab.1 przedstawiono zagregowane operacje technologiczne przykładowego przedsięwzięcia, związanego z budową garażu wielopoziomowego. Odpowiadające mu zależności następstwa operacji ujęto na rys.1.

Tab. 1. Operacje technologiczne przykładowego przedsięwzięcia

Operacja	Nazwa	Poprzedzające operacje
m1	Zagospodarowanie placu budowy	brak
m2	Wykonanie przyłączy infrastrukturalnych	m1
m3	Instalacja sieci oświetlenia zewnętrznego	m1
m4	Roboty ziemne dla kondygnacji podziemnej i uformowanie skarp	m1
m5	Mikropalowanie pod płytę denną i słupy	m4 (m1)
m6	Wykonanie kondygnacji naziemnej i podziemnej	m5 (m1, m4)
m7	Odwodnienie terenu i instalacja docelowego drenażu	m4 (m1)
m8	Roboty wykończeniowe	m6 (m1, m4, m5)
m9	Wykonanie płyt parkingowych	m6 (m1, m4, m5)
m10	Dostarczenie i montaż ogrodzenia obiektu z systemami bezpieczeństwa dostępu	m2 (m1)



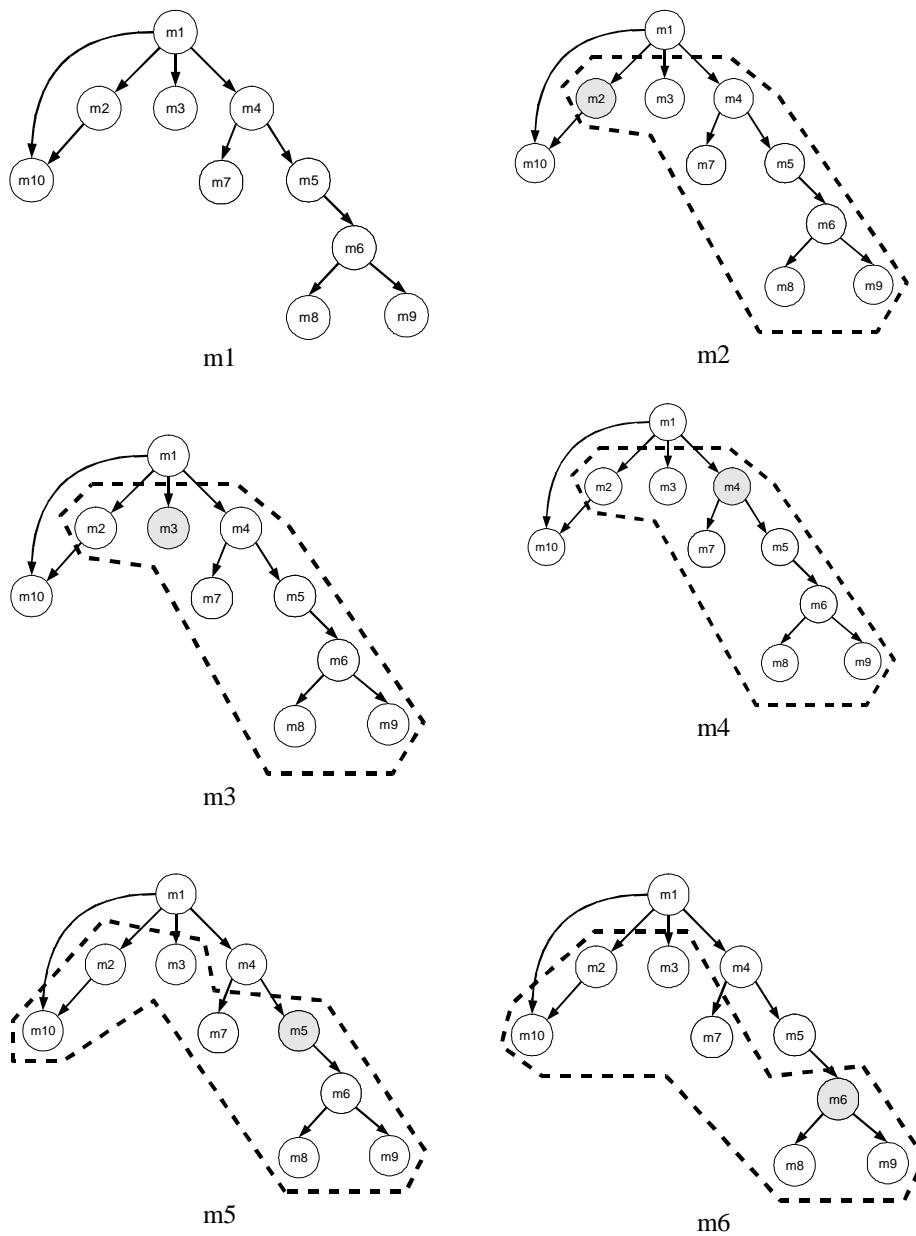
Rys. 1. Graf następstwa operacji

Symbole podane w nawiasach w ostatniej kolumnie tab.1 oznaczają operacje, które poprzedzają (za pośrednictwem operacji bezpośrednio poprzedzających) daną operację. Operacje bezpośrednio i pośrednio poprzedzające daną operację tworzą skojarzony z nią łańcuch operacji poprzedzających. Są one wyraźnie widoczne w przypadku grafu następstwa operacji, którego postać odpowiadającą przykładowemu przedsięwzięciu (tab.1) przedstawiono na rys.1. Liczbami rzymskimi oznaczono na nim 5 poziomów hierarchii operacji, wyróżnionych na podstawie operacji poprzedzających.

Operacje pierwszego poziomu w ogóle nie mają poprzedników. Mogą więc być wykonywane niezależnie od operacji pozostałych poziomów. Można więc je określić jako początkowe (inicjujące realizację przedsięwzięcia). W rozważanym przykładzie poziom pierwszy tworzy pojedyncza operacja m1. Operacje następnych poziomów wymagają wcześniejszego zakończenia operacji tworzących sąsiedni, wyższy poziom hierarchii. Poziom drugi tworzą więc 3 operacje: m2, m3, m4, które można wykonać dopiero po zakończeniu operacji m1. Na poziom trzeci składają się 3 operacje: m5, m7 (wymagają wcześniejszego zakończenia operacji m4, a pośrednio również m1) oraz m10 (wymaga uprzedniego zakończenia operacji m2 (i m1)). Poziom czwarty tworzy operacja m6, wymagająca wcześniejszego wykonania operacji m5 (oraz m1 i m4), której zakończenie jest wymagane przed przystąpieniem do realizacji operacji m8 i m9.

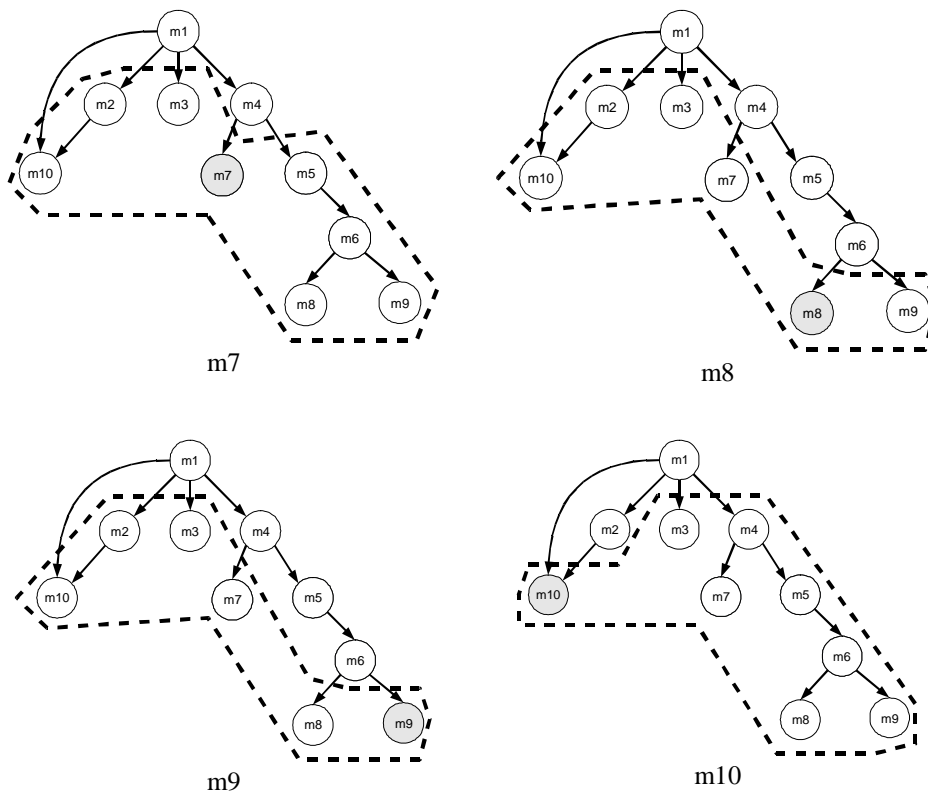
Operacje najniższego poziomu grafu następstwa operacji nie warunkują wykonania innych operacji (nie posiadają następników). Podobnie jak i jedna z operacji II poziomu (m3) oraz dwie operacje III poziomu (m7, m10). Można więc określić je jako końcowe (terminalne), gdyż niezależnie od siebie mogą kończyć wykonywanie przedsięwzięcia.

Klasyfikacja operacji technologicznych zobrazowana na rys.1 pomaga generować różne postaci dopuszczalne (z uwagi na następstwo operacji) grafów technologicznych przedsięwzięcia oraz weryfikować ich dopuszczalność w trakcie identyfikacji najlepszego wariantu przebiegu przedsięwzięcia (tożsamej z poszukiwaniem optymalnej postaci grafu technologicznego). Przykładowo, można na tej podstawie określać dla każdej z operacji zbiory realizowalnych niezależnie od niej operacji. Ich postać odpowiadającą poszczególnym operacjom przedstawiono na rys.2 i rys.3 (operacje niezależnie wykonywalne wyróżniono obszarem ograniczonym linią przerywaną).



Rys. 2. Zestawy niezależnie wykonywalnych operacji otrzymane dla operacji m1-m6

Możliwość niezależnego wykonywania operacji wynika z braku relacji następstwa między 2 rozważanymi operacjami. Oznacza to, że żadna z dwóch niezależnie realizowalnych operacji nie może, ani pośrednio ani bezpośrednio, poprzedzać lub następować po drugiej z operacji.



Rys. 3. Zestawy niezależnie wykonywalnych operacji otrzymane dla operacji m7–m10

W kontekście obliczeń następstwo operacji wygodniej jest przedstawić w postaci macierzowej. Służy temu kwadratowa, zero-jedynkowa macierz następstwa operacji A_x o rozmiarze równym liczbie operacji składających się na przedsięwzięcie. Jednostkowa wartość jej elementu położonego w i -tym wierszu i j -tej kolumnie świadczy o poprzedzaniu i -tej operacji w porządku technologicznym przez operację j -tą. Uwzględnia się przy tym również relacje pośredniego następstwa operacji. Jej postać odpowiadającą przykładowemu, 10-operacyjnemu przedsięwzięciu przedstawiono poniżej (1). Wartości podane w nawiasach odpowiadają pośredniemu następstwu operacji.

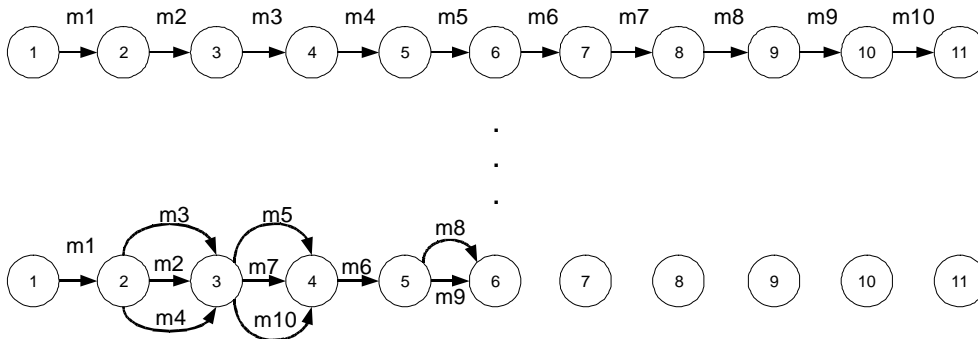
Warto zwrócić uwagę na fakt, że zawartości poszczególnych wierszy można interpretować jako listy operacji poprzedzających (poprzedników) skojarzonych z nimi operacji. Zawartość kolumn macierzy natomiast definiuje listy operacji następujących po danej operacji (następników). Informacje te stają się szczególnie użyteczne w trakcie generowania grafów technologicznych oraz weryfikacji ich dopuszczalności. Jest bowiem oczywiste, że i -tej operacji nie można rozpocząć jeśli nie zostały jeszcze zakończone operacje, którym odpowiadają jednostkowe wartości kolumn i -tego wiersza. Z drugiej strony, jedynka w i -tym wierszu j -tej kolumnie sugeruje rolę i -tej operacji jako następnika j -tej operacji.

$$\mathbf{A}_\prec = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1) & 0 & 0 & (1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1) & 0 & 0 & (1) & (1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1) & 0 & 0 & (1) & (1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Macierz następstwa daje także możliwość łatwej identyfikacji operacji, które można wykonywać niezależnie od siebie (równoległe lub w dowolnej kolejności). Chcąc wiedzieć, które z pozostałych operacji można wykonywać niezależnie od danej, *i*-tej operacji należy sprawdzić zawartości odpowiadającego jej *i*-tego wiersza oraz *i*-tej kolumny macierzy. Na niezależność innej operacji wskazuje brak jednostkowych wartości odpowiadających jej elementów *i*-tego wiersza i *i*-tej kolumny. Na przykład niezależnym operacjom *m*₂, *m*₃ i *m*₄ (por. rys.2) odpowiadają zerowe wartości elementów, odpowiadających każdym dwóm spośród operacji, w wierszu i kolumnie macierzy następstwa poświęconym trzeciej spośród nich.

Korzystając z informacji o następstwie operacji wygenerowano przykładowe dopuszczalne (w sensie następstwa operacji) postaci grafu technologicznego przedsięwzięcia przedstawione na rys.4. Przyjęto przy tym jednoznaczny sposób prezentacji przebiegu przedsięwzięcia przy pomocy acyklicznego i asymetrycznego grafu o liczbie wierzchołków (wyrażających charakterystyczne momenty, zdarzenia w trakcie realizacji przedsięwzięcia, związane rozpoczęciem i kończeniem operacji) o jeden wyższej od liczby operacji składowych (a zarazem wyrażających je łuków). Dzięki takiej notacji możliwe jest uchwycenie zarówno trywialnego uporządkowania operacji (pierwszy graf), jak i bardziej skondensowanych uporządkowań operacji (drugi graf).

Taki sposób odwzorowywania uporządkowania operacji pozwala w jednolity sposób wyrazić różne ich konfiguracje. Posłużono się w tym celu macierzą incydencji łuków \mathbf{Q}_G [2, s.68]. Jej wiersze odpowiadają łukom poszczególnych operacji, natomiast kolumny wierzchołkom (zdarzeniom) grafu technologicznego. Zgodnie z poczynionymi wcześniej założeniami, w przypadku rozważanego przedsięwzięcia liczba wierzchołków jest stała i wynosi 11 (por. rys.4). Do jednoznacznego odwzorowania konfiguracji operacji w jego przypadku jest więc wykorzystywana macierz incydencji o 10 wierszach i 11 kolumnach. Rozpoczęciu *i*-tej operacji *j*-tym zdarzeniem odpowiada wartość elementu na skrzyżowaniu *i*-tego wiersza z *j*-tą kolumną macierzy równa +1. Natomiast wartość tego elementu równa – 1 jest stosowana dla zasygnalizowania przypadku zakończenia *i*-tej operacji *j*-tym zdarzeniem. Postacie macierzy incydencji dla wariantów grafu technologicznego przedstawionych na rys.4 pokazują odpowiednio zależności (2) i (3).



Rys. 4. Przykłady dopuszczalnych pod względem następstwa operacji grafów technologicznych przedsięwzięcia

$$\mathbf{Q}_G = \begin{bmatrix} +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{Q}_G = \begin{bmatrix} +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Przyjęty sposób opisu rodzaju incydencji łuku z wierzchołkiem (wychodząca, wchodząca) powoduje, że graf \mathbf{Q}_G charakteryzuje się stałą wartością wierszowych sum elementów wynoszącą zero. Natomiast wartości sumy kolumnowej świadczą o różnicy między stopniem wychodzącym (liczna skojarzonych z łukiem wartości +1) a wchodzącym

(liczba wartości -1). W ten sposób można zidentyfikować dominujący charakter zdarzeń (inicjujący lub kończący), związanych z poszczególnymi wierzchołkami.

Porównanie postaci (2) i (3) grafu incydencji luku sugeruje celowość upraszczania notacji, związaną z pomijaniem kolumn o wyłącznie zerowych składowych, związanych z wierzchołkami o zerowych wartości składowych (wychodzących i wchodzących) stopnia. Zastosowanie stałej liczby kolumn stwarza jednak możliwość uproszczenia procesu porównywania różnych uporządkowań operacji. Przykładowo, do jednoznacznej identyfikacji konfiguracji operacji można w tym celu użyć charakterystycznego wektora o liczbie składowych równej maksymalnej liczbie zdarzeń (w przykładzie równej 11), otrzymywanych na podstawie jednoznacznego zakodowania postaci składowych poszczególnych kolumn macierzy.

Choć grafy z rys.4 spełniają warunki następstwa operacji i jednoznacznie odwzorowują ich uporządkowanie, nie dają jeszcze gwarancji dopuszczalności i jednoznacznego przedstawienia przebiegu przedsięwzięcia. Powodem są rzeczywiste ograniczenia związane z podażą zasobów. Szczególną rolę odgrywają przy tym środki techniczne, pozwalające na wykonanie prac budowlanych.

O rodzaju wymaganych środków technicznych decyduje przyjmowana technologia wykonywania operacji. Usprawnienie planowania i realizacji operacji uzasadnia stosowanie środków technicznych w postaci zestawów. Ich przykłady przedstawiono w tab.2. Jak widać, odpowiada im znaczne zróżnicowanie.

Z postaci przyjętej technologii wykonania i skojarzonej z nią postaci oraz składu zestawu środków technicznych wynikają parametry technologicznego wariantu operacji, jakimi są np. czas i koszt wykonania operacji. Przy tym zasadniczo uwzględniany jest kwantytatywny parametr operacji nazywany *objętością operacji technologicznej*, wyrażający ilość, związanych z operacją robót. Specyfikację objętości operacji dla rozważanego przykładowego przedsięwzięcia przedstawiono w tab.3.

Współczesne wymagania związane z dążeniem do osiągnięcia w trakcie realizacji przedsięwzięcia wielowymiarowych korzyści powodują, że konieczne staje się uwzględnianie wpływu przeprowadzanych działań na wielowymiarowo rozpatrywane otoczenie. Można to przykładowo osiągnąć przyporządkowując zastosowaniu poszczególnych zestawów środków technicznych wartości parametrów (analogicznych w stosunku do czasu i kosztu wykonania) związanych z oddziaływaniem na otoczenie. W przypadku występowania oddziaływań o trudno mierzalnym charakterze, w celu wyznaczenia tych parametrów można np. posłużyć się metodyką metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji [3].

3. Propozycja sposobu rozwiązania rozważanego zagadnienia

Na podstawie powyższych rozważań można sklasyfikować zagadnienie ustalania optymalnego przebiegu przedsięwzięcia, jako problem nazywany w literaturze (dotyczącej zagadnień szeregowania) wielowariantowym, ograniczonym zasobowo zagadnieniem szeregowania przedsięwzięć (ang. multi-mode resource-constrained project scheduling problem, MMRCPS) [4]. W istocie szeregowanie operacji w budownictwie polega bowiem na alokacji technologicznych wariantów realizacji robót do poszczególnych operacji wraz z niezbędnymi zasobami.

Tab. 2. Przykłady zestawów środków technicznych

Zestaw	Nazwa	Opis składu	Potencjalne zastosowanie
s1	Zespół prostego transportu poziomego wraz z elementami przemieszczanymi	Dźwig samochodowy, samochód ciężarowy z zespołem roboczym i ręcznym wyposażeniem sprzętowym załadowczo-wyładowczym, wraz z elementami i materiałami przemieszczanymi celem wbudowania – roboty przygotowawcze	m1
s2	Zespół transportu poziomego wraz z elementami przemieszczanym	Dźwig samochodowy, samochód wywrotka z zespołem roboczym i narzędziami mechanicznymi o wysokim stopniu specjalizacji wraz z modułami przemieszczanymi w celu wbudowania	m1
s3	Zmechanizowane roboty ziemne płytkie	Koparko-spycharka, zespół roboczy wyposażony w sprzęt ręczny: technologia standardowa wykonywania robót ziemnych i drogowych	m2
s4	Wysoko zmechanizowane roboty ziemne płytkie	Koparko-ładowarka o podwoziu ciągnika 0,5; samochód ciężarowy: wydajna technologia wykonywania robót ziemnych i drogowych	m2, m3
s5	Roboty ziemne	Rozporowe zabezpieczenia wykopów oraz brygada obsługi koparki jednonaczyniowej kołowej 0,25; samochód ciężarowy do transportu materiałów sypkich	m4

Metody wykorzystywane do jego rozwiązywania odpowiadają szerszej klasie problemów, nazywanej ograniczonym zasobowo zagadnieniem szeregowania przedsięwzięć (ang. resource-constrained project scheduling problem, RCPS) [5]. Tworzą one grupy podejść dokładnych oraz przybliżonych. Metody pierwszej grupy są mniej liczne i mają mniejsze znaczenie praktyczne, gdyż dotyczą zasadniczo zagadnień o stosunkowo małych rozmiarach (liczbie operacji i trybów ich realizacji). Należą do nich przede wszystkim metody programowania (zwłaszcza liniowego w wersji całkowitoliczbowej lub mieszanej oraz z ograniczeniami), metody dedykowane i subgradientowe. Za szczególnie użyteczną metodę dokładną uznawana jest metoda podziału i ograniczeń [6]. Niedostatki metod dokładnych sprawiły, że opracowywane są liczne metody przybliżone, pozwalające rozwiązywać zagadnienia o większych rozmiarach, a zarazem o większym znaczeniu praktycznym. Stosowane tu podejścia wykorzystują m.in. schematy aproksymacyjne, metody heurystyczne, poszukiwania lokalne i globalne, metody inspirowane zachowaniem systemów naturalnych i społecznych, metody sztucznej inteligencji, symulację i podejścia hybrydowe. Za najlepsze uznawane są algorytmy genetyczne [7] oraz lokalne poszukiwania [8].

Tab. 3. Opis podstawowych parametrów operacji przykładowego przedsięwzięcia

Operacja	Szczegółowy opis i objętość operacji
m1	Kompletacja, załadunek, przewóz, wyładunek i montaż 6 kontenerów i uruchomienie wszystkich obiektów zaplecza budowy – 5000 m²
m2	Montaż: 1 stacji trafo, 1 lokalnej oczyszczalni ścieków, 1 stacji pomp wody
m3	Montaż 12 słupów oświetleniowych, położenie 500 m kabla zasilającego, montaż 1 centralki automatycznego sterowania oświetleniem
m4	Przemieszczenie lokalne (oraz częściowe wywiezienie na odległość do 30 km) 10000 m³ ziemi
m5	Zastosowanie 80 mikropali i wykonanie 24 słupów nośnych konstrukcji
m6	Wykonanie 800 m³ konstrukcji żelbetowej kondygnacji podziemnej i 320 t konstrukcji metalowej naziemnej
m7	Położenie 300 m drenów oraz wykonanie 8 studzienek
m8	Wykonanie 120 m² ściany ceramicznej otynkowanej dwustronnie, 160 m² luksferów, 80 m² podwójnych szyb w stalowych ramach
m9	Realizacja 800 m² zdylatowanych płyt podłogi przemysłowej z odstożnikami olejowymi
m10	Wykonanie 300 m ogrodzenia wg projektu, zainstalowanie 8 kamer , położenie 400 m kabla , zainstalowanie 2 monitorów kontroli dostępu oraz 1 automatycznego systemu komputerowej rejestracji

W niniejszej pracy zaproponowano nieco inne podejście. Wiąże się ono z przeszukiwaniem przestrzeni dopuszczalnych wariantów uporządkowania operacji w celu znalezienia najlepszego przebiegu przedsięwzięcia. Wykorzystuje się w tym celu następującą procedurę:

1. Generowanie populacji grafów technologicznych rozważanego przedsięwzięcia.
2. Weryfikacja poprawności (dopuszczalności) wygenerowanych grafów.
3. Optymalizacja jedno- lub wielokryterialna poszczególnych postaci grafu.
4. Poszukiwania wariantów sprawnych globalnie przy wykorzystaniu:
 - topologicznych własności struktur uporządkowania operacji,
 - charakterystyk harmonogramów.
5. Wyznaczanie odległości najlepszego ekstremum lokalnego od oszacowania ekstremum globalnego w funkcji czasu obliczeń lub liczby przeglądanych wariantów grafu technologicznego.

Warianty mogą być generowane w różny (sekwencyjny, losowy i ewolucyjny) sposób. Na przykład, można w tym celu podzielić procesy na grupy niezależnie wykonywalnych operacji, a następnie losować kolejność operacji, redukując stopniowo zawartość poszczególnych grup.

Globalnie sprawne warianty grafu technologicznego otrzymuje się dzięki sformułowaniu i rozwiązaniu odpowiednich modeli optymalizacyjnych. Z uwagi na możliwości znacznego stopnia agregowania operacji w budownictwie uznano, że otrzymywane rozmiary zadania nie będą zbyt duże (do kilkunastu operacji). Agregowanie operacji sprzyja bowiem dekompozycji zastosowanej w odniesieniu do różnych aspektów i poziomów skali działalności, począwszy od poziomu działań przedsiębiorstwa lub dewelopera, a skończywszy na funkcjonowaniu pojedynczej budowy. Można w ten sposób rozważać bardzo duże zagadnienia, rozbijając je na szereg poziomów od najbardziej ogólnych do

szczegółowych. Rozwiązania większych, bardziej ogólnych zagadnień wyższych poziomów uzyskuje się następnie poprzez umiejętną agregację rozwiązań problemów bardziej szczegółowych, tworzących niższe poziomy hierarchii modeli.

Do uzyskania rozwiązań optymalnych, związanych z wygenerowanymi postaciami grafów technologicznych i przyjętymi kryteriami optymalizacji, technologicznymi wystarcza więc zastosowanie metod dokładnych. Ponieważ efekty całego przedsięwzięcia kształtowane są wynikami realizacji poszczególnych operacji, użyto liniowych modeli optymalizacyjnych (mieszane programowanie liniowe). Do wykonania obliczeń wykorzystano ogólnie dostępne, wieloplatformowe i wolne narzędzie GNU Linear Programming toolKit (<http://www.gnu.org/software/glpk/>). Dzięki użyciu skryptowego środowiska generowania danych i analizy otrzymany wyniki obliczenia można w znacznym stopniu zautomatyzować. Prowadzi to do zwiększenia efektywności analizy.

Początkowo, w celu rozpoznania charakteru zagadnienia, wskazane jest przeprowadzenie analizy, ujmując zagadnienia o niewielkich rozmiarach. Dają one bowiem możliwość uzyskania kompletnej populacji grafów technologicznych przedsięwzięcia. Przeprowadzenie takich analiz jest w stanie dostarczyć rezultaty, pozwalające na odpowiednie ukierunkowanie właściwych badań.

4. Podsumowanie

Dzięki zastosowaniu dekompozycji opisany sposób wyznaczania (przybliżania) globalnie najlepszego wariantu realizacji przedsięwzięcia można zastosować w odniesieniu do zagadnień harmonogramowania przebiegu przedsięwzięć w budownictwie.

Poza zasadniczym efektem związanym z identyfikacją najlepszego wariantu przebiegu przedsięwzięcia, na podstawie wyników uzyskanych przy wykorzystaniu zaproponowanego podejścia można również formułować ważne wskazówki praktyczne na temat optymalnych postaci struktury grafu technologicznego. Ich użycie pozwala na wybór uporządkowania procesów bardziej korzystnie od intuicyjnie dobieranych przez planistów i standardowe oprogramowanie wspomagające planowanie przedsięwzięć.

Literatura

1. Ambroziak T.: Metody i narzędzia harmonogramowania w transporcie. Biblioteka Problemów Eksploatacji, ITE, Warszawa, 2007.
2. Kulikowski J.L.: Zarys teorii grafów. Seria: Biblioteka Naukowa Inżyniera. PWN, Warszawa, 1986.
3. Dytczak M.: Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie. Politechnika Opolska, Opole, 2010.
4. Węglarz J., Józefowska J., Mika M., Waligóra G.: Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes □ A survey. Eur J Oper Res, vol.208, 2011, s.177–205.
5. Brucker P., Drexel A., Möhring R., Neumann K., Pesch E.: Resource constrained project scheduling. Notation. Classification, models and methods, Eur J Oper Res vol.112, 1999, s.3–41.
6. Hartmann S., Drexel A.: Project scheduling with multiple modes: A comparison of exact algorithms. Networks, vol.32, 1998, s.283–298.

7. Alcatraz J., Maroto C., Ruiz R.: Solving the multi-mode resource constrained project scheduling problem with genetic algorithms. *J Oper Res Soc*, vol.54, 2003, s.614–626.
8. Mika M., Waligóra G., Węglarz J.: Simulated annealing and tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with positive discounted cash flows and different payment models. *Eur J Oper Res*, vol.164, 2008, s.639–668.

Prof. dr hab. inż. Mirosław DYT CZAK
Wydział Budownictwa
Politechnika Opolska
45-061 Opole, ul. Katowicka 48
e-mail: mdytczak@gmail.com

Dr inż. Grzegorz GINDA
Wydział Zarządzania
Politechnika Opolska
45-047 Opole, ul. Waryńskiego 4
e-mail: gginda@gmail.com

Mgr inż. Tomasz WOJTKIEWICZ
WACETOB
02-548 Warszawa, ul. Olesińska 21
e-mail: ctb@wacetob.com.pl