



Bilansowanie hierarchicznej struktury zasobów w planowaniu przedsięwzięć inżyniersko-budowlanych

RADOSŁAW SEKUNDA¹, ROMAN MARCINKOWSKI²

¹Biuro Inżynierskie, 05-082 Blizne Łaszczuńskiego, ul. Warszawska 33B, biuro@invest-home.pl

²Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki
Warszawskiej, Instytut Budownictwa,
09-400 Płock, ul. Łukasiewicza 17, marcinkowski@pw.plock.pl

Streszczenie. W artykule podjęto problem rozdziału i bilansowania hierarchicznej struktury zasobów w planowaniu realizacji przedsięwzięć inżyniersko-budowlanych. W sposób syntetyczny opisano istotę hierarchicznej struktury zasobów oraz planowania robót inżyniersko-budowlanych z wykorzystaniem zasobów złożonych. Przedstawiono matematyczny model: realizatora, struktury i zakresu przedsięwzięcia oraz model zagadnienia wspomaganie decyzji alokacji złożonej struktury zasobów do realizacji robót inżyniersko-budowlanych. Przedstawiona w pracy analiza jest częścią szerszych studiów nad problemem harmonogramowania pracy jednostek organizacyjnych zorganizowanych w struktury zhierarchizowane.

Słowa kluczowe: budownictwo, zasoby złożone, wspomaganie decyzji, zarządzanie zasobami

DOI: 10.5604/12345865.1168728

1. Wprowadzenie

Istotą planowania jakiejkolwiek działalności jest ustalenie terminarza wykonania zadań i potrzeb zasobowych. Obie te charakterystyki zależą od:

- nakładów rzeczowych na wykonanie zadań,
- przydziału zasobów czynnych (zdefiniowanych w pracach [5, 6]) do wykonania zadań (ustalenia liczby jednostek wykonawczych),
- zależności technologiczno-organizacyjnych występujących między zadaniami.

O ile nakłady rzeczowe na wykonanie zadań są charakterystyką obiektywną procesów budowlanych (aby wykonać określony rodzaj i zakres robót, trzeba ponieść określone nakłady pracy ludzi i maszyn oraz zużyć określone materiały), o tyle liczby zasobów czynnych (wykonujących pracę) skierowanych do wykonania poszczególnych zadań są zależne od decyzji planującego. On podejmuje w tym kontekście szereg decyzji przydziałów zasobów do zadań, dążąc do zbilansowania potrzeb zasobowych z ich dostępnością w skali czasu. Takie bilansowanie jest realizowane w każdym procesie tworzenia harmonogramu przedsięwzięcia, w tym przedsięwzięcia budowlanego.

Bilansowanie zasobów addytywnych jest stosunkowo prostą czynnością analityczną, bowiem polega na zliczaniu przydzielonych zasobów w ustalonych jednostkach czasu i porównywaniu potrzeb z dostępnością zasobów w tych jednostkach czasu. Wynikiem porównania jest najczęściej stopień wykorzystania danego zasobu w czasie. W sytuacji braku zasobów weryfikuje się terminy realizacji planowanych zadań i przydziały zasobów do zadań. Analizy takie mogą być wspomagane programami do planowania i kontroli realizacji przedsięwzięć, a teoretyczne podstawy można znaleźć w obszernej literaturze dotyczącej harmonogramowania [1, 4] i teorii szeregowania zadań [7, 12, 13].

Istotą problemu podjętego w niniejszej pracy jest analiza złożonej struktury zasobów czynnych w planowaniu przedsięwzięć inżynieryjno-budowlanych. Złożona struktura zasobów to taka, w której jednostki zasobowe tworzą pewną strukturę typu hierarchicznego (jednostki niższego szczebla struktury tworzą jednostki wyższego poziomu). W działaniach wojskowo-inżynieryjnych taką strukturę tworzą wojska inżynieryjne. Na najniższym poziomie struktury są żołnierze — specjaliści i sprzęt inżynieryjno-saperski, a na wyższych poziomach znajdują się drużyny, plutony, kompanie itd. odpowiednich specjalności.

Problem zarządzania złożoną strukturą zasobów, w tym planowania (harmonogramowania) działań lub przedsięwzięć, ma swoją specyfikę. Sprowadza się ona do konieczności uwzględniania w planowaniu zdekompletowania jednostek złożonych (wyższych szczebli hierarchii) poprzez przydziały do zadań jednostek podrzędnych (niższych szczebli hierarchii) oraz potrzeby śledzenia stanu zasobów w toku realizacji działań.

Istotnym elementem każdego planowania jest racjonalne gospodarowanie dostępnymi zasobami czynnymi. Dobry plan to taki, w którym wykorzystanie dostępnych zasobów jest w miarę równomierne i maksymalne. Prowadzi to do minimalizowania czasu wykonania przedsięwzięcia przy efektywności ekonomicznej wykorzystania zasobów. Efektywność tę R. Marcinkowski w [2, 3] mierzy kosztami czasu „straconego” przez dostępne zasoby, które w określonych przedziałach czasu nie pracują, oczekując na przykład na zwolnienie frontu robót przez inne zasoby.

W niniejszej pracy rozpatrywać będziemy problem rozdziału i bilansowania hierarchicznej struktury zasobów czynnych w planowaniu realizacji przedsięwzięć inżynieryjno-budowlanych. Celem analizy będzie wyznaczenie realizatorów zadań

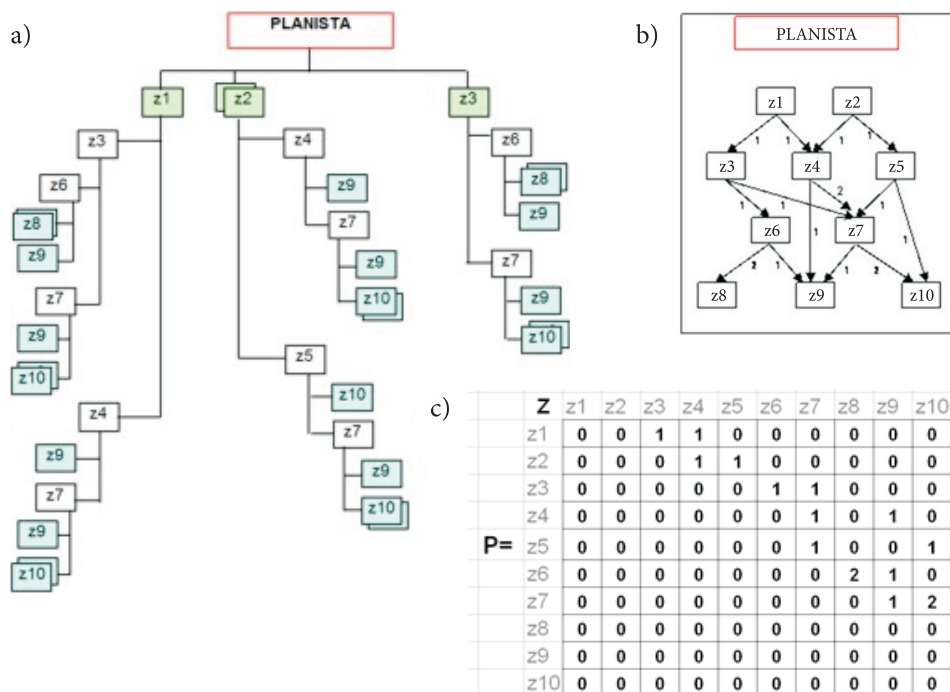
z jednoczesną oceną efektywności realizacji tych zadań oraz kontrolą dostępności zasobów na wszystkich poziomach hierarchii ich struktury.

2. Specyfika planowania realizacji przedsięwzięć z wykorzystaniem zasobów złożonych

2.1. Istota złożonej struktury zasobów

Istotę złożoności (hierarchii) zasobów przedstawia poglądowo rysunek 1. Określono na nim nazwy zasobów (z_1, z_2, \dots, z_{10}), między którymi istnieje pewien stały układ zależności (przełożenia — podległości). W strukturze tej możemy umownie wyróżnić:

- zasoby bezpośrednio podległe planującemu — nazywane dalej **zasobami bezpośredniego podporządkowania** (tu: z_1, z_2, z_3);
- **zasoby podstawowe** znajdujące się na najniższym szczeblu hierarchii (tu: z_8, z_9, z_{10});
- pozostałe zasoby — nazywane dalej **zasobami pośrednimi** (tu: z_4, z_5, z_6, z_7).



Rys. 1. Hierarchiczny układ struktury zasobów realizatora (przykład): a) schemat organizacyjny realizatora; b) graf opisujący hierarchię zasobów; c) interpretacja macierzowa hierarchicznej struktury realizatora

Zauważmy przy tym, że określony zasób (np. z_3) może być jednocześnie zasobem bezpośredniego podporządkowania oraz zasobem pośrednim. Dlatego też dalej będziemy wyróżniać jedynie **zasoby podstawowe i złożone**. **Zasoby podstawowe** to jednostki, których nie można podzielić w przydziałach do prac. Poprzez ich rodzaj i dostępną ilość może być określony potencjał realizatora lub potencjał zasobu złożonego. **Zasoby złożone** bowiem charakteryzowane są strukturą, której potencjał określa zbiór jednostek ze szczebla zasobów podstawowych.

2.2. Istota planowania działań jednostek organizacyjnych o złożonej strukturze zasobów

Zarządzanie zasobami o złożonej strukturze zasobów polega na alokacji pewnych fragmentów tej struktury (**różnego szczebla hierarchii**) do realizacji określonych frontów robót. **Frontem robót** jest terytorialnie wydzielony zbiór określonych zadań, w szczególnym przypadku może być nim jedno zadanie. **Zadaniem** zaś jest proces budowlany, dla którego określono nakłady czasu pracy zasobów czynnych i zużycia zasobów biernych lub czas i wykonawcę zadania. Dla każdego frontu robót określony jest przedział czasu, w którym należy wykonać wszystkie zadania tego frontu.

Zadaniem planisty (dowódcy) jest ustalenie realizatorów robót na poszczególnych frontach tak, aby wykonać zadania w wymaganym terminie. Polega to głównie na decyzyjnym „przeniesieniu” pewnych elementów struktury na fronty robót, przy uwzględnieniu układu hierarchicznego i kontroli dostępności zasobów czynnych.

W dotychczasowej praktyce takie postępowanie nie ma określonego algorytmu. Planista, stosując sobie tylko znany sposób prowadzenia analizy myślowej, kojarzy zadania z wykonawcami. Sposób ten może zawodzić w sytuacjach losowej, naglej zmiany stanu posiadania (awaria sprzętu, straty wojenne itp.). Jednostki organizacyjne stanowiące fragmenty globalnej struktury zostają wówczas zdekompletowane i jedynie inwencja i pomysłowość dowódcy mogą w tej sytuacji zapobiec chaosowi organizacyjnemu.

W praktyce planowanie operacyjne opiera się na analizie **norm wydajności** wykonania zadań przez zasoby z wybranego „szczebla” struktury oraz na analizie **norm czasowych** realizacji tych zadań — także w odniesieniu do zasobów z określonego poziomu hierarchii.

Przy **analizie wydajności zasobów złożonych** proces planowania obejmuje następujące zagadnienia:

- przydział zadań do zasobów — realizowany na podstawie analizy możliwości technologiczno-organizacyjnych wykonania zadań;
- określenie dostępności zasobów mogących realizować powyższe zadania — z uwzględnieniem złożonego charakteru zasobów;
- alokację zasobów będących pewnym fragmentem struktury hierarchicznej do realizacji zadań.

Warunkami ograniczającymi decyzje planisty są: konieczność realizacji frontów robót w terminach dyrektywnych oraz racjonalnie wysoki stopień wykorzystania potencjału wykonawczego przydzielonego zasobu.

W planowaniu działań przez pryzmat **nakładów rzeczowych** decyzje planisty posiadają identyczne ograniczenia (czasu, dostępności frontów i zasobów), a sposób analizy przebiega następująco:

- określane są nakłady na wykonanie zadań w ramach frontów robót. Nakłady mogą być odniesione do jednostek z dowolnego szczebla złożonej struktury zasobów;
- następuje kojarzenie wymagań nakładów pracy zasobów wymaganych do realizacji frontów robót z potencjałem produkcyjnym poszczególnych typów zasobów złożonych. Na tym etapie aspekt dostępności zasobów nie jest rozpatrywany;
- określana jest dostępność zasobów mogących realizować powyższe zadania (kontrola dostępności zasobów);
- następuje przydział zasobów na fronty robocze.

Prowadzenie takich analiz bez wspomaganie komputerowego nie gwarantuje racjonalności podjętych decyzji. Obejmuje bowiem zbyt wiele zagadnień, które są trudne do kontrolowania jedynie na podstawie procesu myślowego.

2.3. Problemy zarządzania zasobami zhierarchizowanymi

Podczas planowania robót inżynieryjno-budowlanych z wykorzystaniem zasobów złożonych istnieje konieczność rozwiązania dwóch zasadniczych problemów:

- problemu przydziału zasobów ze złożonej struktury realizatora — do realizacji frontów robót;
- problemu kontrolowania dostępności zasobów w odniesieniu do różnych poziomów struktury organizacyjnej. Zauważmy, że z **kontrolą dostępności** zasobów ściśle związany jest aspekt **kontroli zajętości** zasobów skierowanych na fronty robocze oraz **absencji** zasobów z przyczyn niezależnych od prowadzonej analizy planistycznej.

Oba problemy wynikają ze złożonego charakteru zasobów i powodują, że proces planowania działań jednostek o strukturach zhierarchizowanych jest zagadnieniem dużo bardziej skomplikowanym niż planowanie działań jednostek, których stan posiadania określają addytywne jednostki zasobowe. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że istniejące programy komputerowe do planowania realizacji przedsięwzięć nie są w stanie wspomagać analiz planującego w powyższym zakresie.

W niniejszej pracy przedstawiona zostanie propozycja metodyki rozdziału i bilansowania hierarchicznej struktury zasobów w planowaniu realizacji przedsięwzięć inżynieryjno-budowlanych z uwzględnieniem istoty hierarchicznej struktury zasobów i przyjmowanych w praktyce planistycznej preferencji.

3. Alokacja hierarchicznej struktury zasobów w planowaniu przedsięwzięć inżyniersko-budowlanych

3.1. Model realizatora o zasobach zorganizowanych w strukturę zhierarchizowaną

Wykonawcą nazywa się realizatora, którego stan posiadania określa zbiór zasobów czynnych zorganizowanych w strukturę zhierarchizowaną. Niech nazwy zasobów czynnych tworzą zbiór: $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_z\}$.

Hierarchię struktury zasobów określa macierz *przełożenia* — *podległości* $\mathbf{P} = [p_{sk}]_{z \times z}$, w której: p_{sk} — oznacza liczbę jednostek zasobu o indeksie $k : z_k \in Z$ w każdej jednostce zasobu o indeksie $s : z_s \in Z$ pozostających w bezpośredniej podległości (rys. 1).

W opisywanym modelu zasobami podstawowymi są zasoby, które nie posiadają w swojej strukturze zasobów szczebla niższego. Stanowią one pewien podzbiór Z' zbioru Z , w którym dla elementów zbioru Z zachodzi zależność: $\sum_{k=1}^z p_{sk} = 0$.

Pozostałe zasoby to zasoby złożone, które umownie możemy podzielić na zasoby znajdujące się na szczycie hierarchii (nazwane **zasobami bezpośredniego podporządkowania**) oraz znajdujące się na pozostałych szczeblach struktury (nazwane **zasobami pośrednimi**).

Zarówno zbiór Z , jak i macierz \mathbf{P} uszeregowane są topologicznie, tzn. indeksy zasobów nadawane są od góry hierarchii — zasoby z wyższego poziomu hierarchii posiadają indeksy niskie, które wzrastają wraz z niższymi poziomami struktury, aż do szczebla zasobów podstawowych.

Na podstawie macierzy \mathbf{P} określić można *wektory struktury jednostek organizacyjnych* $s = 1, 2, \dots, z$: $\mathbf{R}^s = [r_1^s, r_2^s, \dots, r_k^s, \dots, r_z^s]$, w których elementy przyjmują wartości:

$$r_k^s = \begin{cases} 0 & \text{dla elementów, dla których } k < s, \\ 1 & \text{dla elementów, dla których } k = s, \\ \sum_{i=s}^{k-1} p_{ik} \cdot r_i^s & \text{dla elementów, dla których } k = s + 1, s + 2, \dots, z. \end{cases} \quad (1)$$

Element r_k^s wektora \mathbf{R} określa liczbę jednostek zasobu o indeksie $k : z_k \in Z$ w każdej jednostce zasobu o indeksie $s : z_s \in Z$. Każdy **zasób** zdefiniowany jest tu bardzo ściśle. Określone jednostki zasobowe **tego samego typu (tej samej nazwy)** są identyczne pod względem struktury, wyposażenia i możliwości działania.

Punktem wyjścia do planowania przedsięwzięć jest określenie stanu posiadania zasobów — w naszym przypadku jednostek organizacyjnych. Niech więc

stan posiadania zasobów: $\{z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_z\}$ w aspekcie ilościowym opisuje macierz struktury złożonej $\mathbf{Q} = [q_{kt}]_{z \times H}$, której: q_{kt} określać będzie ilość jednostek zasobu o indeksie $k : z_k \in Z$ możliwych do wygenerowania (z zasobów podstawowych) w postaci addytywnych jednostek, kompletnych pod względem wewnętrznej struktury organizacyjnej, dostępnych w jednostce czasu $t = 1, 2, \dots, H$ (gdzie: H — horyzont czasu planowania). Elementy q_{kt} są określane poprzez analizę dostępnej ilości zasobów podstawowych, a następnie ich łączenia w struktury poszczególnych typów zasobów.

3.2. Model struktury i zakresu przedsięwzięcia

Wykonawca, opisany w sposób przedstawiony w poprzednim podrozdziale, jest w stanie realizować pewien otwarty zbiór zadań: $O = \{o_1, o_2, \dots, o_i, \dots, o_n\}$. Są one podstawowymi jednostkami kalkulacyjnymi w planowaniu działań. Stanowią je roboty inżynieryjno-budowlane, dla których określono normatywne nakłady pracy.

Dla każdego zadania zbioru O określone są więc **nakłady rzeczowe** odniesione do struktury zasobów. Przyjmijmy, że nakłady te opisuje macierz: $\mathbf{N} = [n_{ik}]_{n \times z}$, w której n_{ik} oznacza nakład czasu pracy (w przyjętych jednostkach czasu, np. godzinach lub dniach) zasobu $k : z_k \in Z$ dla realizacji przyjętej jednostki obmiarowej zadania $i : o_i \in O$. Zasoby występujące w jednym zadaniu są zawsze zasobami addytywnymi, mogącymi stanowić jednocześnie elementy zespołu roboczego (utworzonego doraźnie dla potrzeb realizacji zadania).

W modelowanym zadaniu rozpatruje się problem alokacji zasobów, w tym także przydziału pewnych fragmentów struktury hierarchicznej na fronty robót.

Niech nazwy frontów robót tworzą zbiór: $F = \{f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_m\}$. Dla każdego frontu znany jest zakres robót, który określony został przez przyzmat zbioru zadań O .

Znana jest więc macierz: $\mathbf{K} = [k_{ij}]_{n \times m}$, w której k_{ij} określa ilość jednostek obmiarowych zadania $i : o_i \in O$ do wykonania w ramach frontu robót $j : f_j \in F$. Wartości k_{ij} są więc przedmiarami robót.

Na podstawie znanych nakładów (macierzy \mathbf{N}) oraz przedmiaru robót (rodzaju i ilości zadań w ramach określonych frontów roboczych) — macierz \mathbf{K} , obliczyć można pracochłonność poszczególnych frontów robót przez przyzmat niezależnie traktowanych zasobów struktury hierarchicznej. Pracochłonność taką określa macierz: $\mathbf{W} = [w_{kj}]_{z \times m}$, w której w_{kj} oznacza nakład czasu pracy zasobu $k : z_k \in Z$ do wykonania zadań w ramach frontu $j : f_j \in F$. Wartość elementów w_{kj} obliczana jest z zależności:

$$w_{kj} = \sum_{i=1}^n n_{ik} \cdot k_{ij}. \quad (2)$$

Wartości elementów w macierzy \mathbf{W} określają więc pracochłonność addytywnych (niezależnych od siebie) jednostek zasobowych ze struktury zasobów.

W celu określenia pracochłonności frontów robót przez pryzmat zasobów podstawowych uwzględnić należy wewnętrzną strukturę zasobów („zagnieżdżenie zasobów”), których wymaganą ilość zawiera macierz \mathbf{W} .

W tym celu generowana jest macierz: $\mathbf{W}' = [w'_{kj}]_{z \times m}$, w której elementy w'_{kj} przyjmują wartości:

$$\begin{aligned} w'_{1j} &= w_{1j} && \text{dla } j = 1, 2, \dots, m; \\ w'_{kj} &= w_{kj} + \sum_{i=1}^{k-1} p_{ik} \cdot w_{ij} && \text{dla } k = 2, 3, \dots, z; \text{ dla } j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (3)$$

Założmy, że wszystkie fronty robót mają określone dyrektywne terminy realizacji (od-do): e_j^s, e_j^f , gdzie: e_j^s oznacza najwcześniejszy możliwy termin rozpoczęcia prac na froncie $j: f_j \in F$, a e_j^f oznacza najpóźniejszy dopuszczalny termin zakończenia prac na froncie $j: f_j \in F$.

Terminy te mają wpływ na określenie niezbędnej liczby zasobów, które należy skierować na poszczególne fronty robót. Krótki przedział czasowy implikuje potrzebę spiętrzenia prac — skierowania większej ilości zasobów na front robót. I odwrotnie: długi przedział czasowy pozwala na przydział mniejszej liczby zasobów.

3.3. Analiza możliwości wykonania zadań

Gdy posiadamy informację o pracochłonności poszczególnych frontów robót oraz terminach dyrektywnych ich realizacji, analiza możliwości wykonania zadań może być prowadzona w dwóch aspektach:

1. Realizacji frontów roboczych ze ścisłym dotrzymaniem terminów dyrektywnych (od-do). Ten sposób analizy nazwijmy **analizą potrzebnych zasobów**.
2. Czasu realizacji frontów roboczych przy określonym poziomie przydzielonych zasobów — **analiza czasu wykonania zadań**.

Analiza potrzebnych zasobów

Celem analizy potrzebnych zasobów jest określenie ilości **jednostek zasobów podstawowych** wymaganych na poszczególnych frontach robót tak, aby dyrektywne terminy realizacji frontów zostały dotrzymane. W analizie bazuje się na:

- znanej pracochłonności frontów robót w odniesieniu do szczybla zasobów podstawowych (macierz \mathbf{W}');
- wymaganym czasie realizacji poszczególnych frontów roboczych:
 $t_j = e_j^f - e_j^s$.

Niech wymagane do realizacji robót na frontach f_j ($j = 1, 2, \dots, m$) **nakłady pracy zasobów podstawowych** określa macierz: $\mathbf{B} = [b_{kj}]_{z \times m}$, w której: b_{kj} określa nakład pracy zasobu $k : z_k \in Z'$ wymagany do realizacji zadań w ramach frontu robót $j : f_j \in F$ w przedziale czasu ograniczonym terminami dyrektywnymi. Wartości te wyznaczyć możemy z zależności:

$$b_{kj} = \frac{w'_{kj}}{e^f_j - e^s_j} \text{ dla } k : z_k \in Z' \text{ dla } j : f_j \in F. \quad (4)$$

Na podstawie macierzy \mathbf{B} generowana zostaje macierz: $\mathbf{B}'' = [b''_{kj}]_{z \times m}$, w której:

$$b''_{ij} = \min_{k : z_k \in Z} \frac{b'_{kj}}{r^i_k} \text{ dla } i = 1, 2, \dots, z; j = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

gdzie: b''_{kj} — oznacza ilość jednostek zasobu typu $k : z_k \in Z$, którą można utworzyć (poskładać) z jednostek zasobów podstawowych, do realizacji frontu $j : f_j \in F$ w terminie dyrektywnym. Elementy $b''_{kj} = \text{ent}[b_{kj}]$ są wartościami całkowitoliczbowymi będącymi wynikiem zaokrąglania wartości b_{kj} „w górę” do pełnych wartości, reprezentującymi ilości jednostek danego typu (nazwy) zasobu.

Istotą i celem tworzenia macierzy \mathbf{B}'' jest wspomaganie planisty przy podejmowaniu decyzji dotyczącej przydziału **zasobów złożonych** do realizacji frontów robót.

Decyzję planującego dotyczącą przydziału zasobów na fronty robocze zawiera macierz: $\mathbf{X} = [x_{kj}]_{z \times m}$, w której: x_{kj} oznacza ilość jednostek zasobów $k : z_k \in Z$ alokowaną decyzyjnie przez planującego do realizacji zadań (wszystkich występujących zadań) w ramach frontu $j : f_j \in F$.

Dodatkowo, w celu oceny racjonalności podjętych przez planującego decyzji, tworzona jest równocześnie macierz: $\mathbf{U} = [u_{kj}]_{z \times m}$, w której: u_{kj} oznacza brakującą (lub nadmiarową) ilość jednostek zasobów podstawowych w stosunku do ilości wymaganej do realizacji frontu $j : f_j \in F$ w terminie dyrektywnym. Elementy macierzy \mathbf{U} obliczane są z zależności:

$$u_{kj} = b'_{kj} - \sum_{i=1}^k x_{ij} \cdot r^i_k \text{ dla } k : z_k \in Z', \text{ dla } j : f_j \in F. \quad (6)$$

Na jej podstawie tworzona jest kolejna macierz: $\mathbf{U}' = [u'_{kj}]_{z \times m}$, w której: u'_{kj} oznacza ilość jednostek zasobu $k : z_k \in Z$, którą można utworzyć z jednostek zasobów podstawowych $k : z_k \in Z'$, brakujących (lub nadmiarowych) w stosunku do ilości wymaganej do realizacji frontu $j : f_j \in F$ w terminie dyrektywnym. Elementy u'_{kj} oblicza się z zależności:

$$u'_{kj} = \min_{k:z_k \in Z} \frac{u_{kj}}{r_k^i} \text{ dla } i = 1, 2, \dots, z; j = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

Dane zawarte w macierzach U oraz U' informują zwrotnie (jako skutek decyzji zawartej w macierzy X) planującego o zasobach „nadwyżkowych” przydzielonych na fronty robocze; ewentualnie o niedoborach zasobowych mogących powstać w wyniku błędnych decyzji w zakresie przydziału zasobów do realizacji tych frontów.

Zauważmy, że istotą prezentowanego podejścia jest analiza alokacji prowadzona na poziomie zasobów podstawowych, a następnie odnoszenie jej wyników do hierarchicznego charakteru struktury.

Analiza czasu wykonania zadań

Celem analizy jest określenie czasu realizacji frontów robót, będącego konsekwencją alokacji hierarchicznej struktury zasobów do realizacji tych frontów.

Decydenta może interesować bowiem nie tylko informacja dotycząca ilości niezbędnych zasobów do realizacji frontów robót w terminach dyrektywnych (analiza opisana powyżej). Pożądana może być również informacja dotycząca czasu realizacji frontów robót po decyzyjnym przydziale określonej ilości zasobów (różnych typów) do ich realizacji.

Czas realizacji zadań w ramach frontu robót $j: f_j \in F$ jest określany z zależności:

$$t_j = \max_{k:z_k \in Z} \frac{w_{kj}}{\sum_{i=1}^k x_{ij} \cdot r_k^i} \text{ dla } j = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

Wiadomo, że czas realizacji określonego frontu $j: f_j \in F$ determinowany jest sumaryczną wydajnością zasobów podstawowych tego typu, dla którego stopień wykorzystania jednostek zasobowych jest w danej sytuacji maksymalny. Zasoby pozostałych typów będą tu wykorzystane w mniejszym stopniu lub wcale.

Oba rodzaje analiz — potrzebnych zasobów oraz czasu wykonania zadań — powinny być kontrolowane **oceną dopasowania realizatora do realizacji zadań**.

Ocena dopasowania realizatora do realizacji zadań

Miernikiem stopnia dopasowania wykonawcy (zespołu wykonawczego) do realizacji frontów robót jest koszt strat z tytułu niepełnego (nieefektywnego) wykorzystania zasobów podczas realizacji tych frontów.

Całkowite koszty strat obciążające poszczególne fronty robót opisuje wektor: $C = [c_j]$, w którym c_j określać będzie całkowity koszt strat związanych z niepełnym wykorzystaniem potencjału w realizacji zadań na froncie $j: f_j \in F$.

Elementy wektora **C** obliczane są z zależności:

$$c_j = \sum_{k:z_k \in Z'} \left[\left(\sum_{i=1}^k x_{ij} \cdot r_k^i \right) - b_{kj} \right] \cdot c_k^{zp} \quad \text{dla } k:z_k \in Z', \quad \text{dla } j:f_j \in F, \quad (9)$$

gdzie: c_k^{zp} określa **koszt jednostkowy** związany z niepełnym wykorzystaniem zasobu $k:z_k \in Z'$.

Wartości c_j wskazują planującemu, na których frontach roboczych stopień dopasowania realizatora jest racjonalny, a które generują nieakceptowalne koszty wynikające z nadmiarowej ilości przydzielonych zasobów.

4. Alokacja hierarchicznej struktury zasobów — przykład

Przyjmijmy, że przedmiotem analizy będzie struktura zasobów zorganizowanych w hierarchię pokazaną na rysunku 1. Niech zadanie polega na rozwiązaniu prostego zagadnienia alokacji zasobów do wykonania pięciu zadań: $O = \{o_1, o_2, o_3, o_4, o_5\}$ w ramach trzech frontów robót: $F = \{f_1, f_2, f_3\}$ w pewnym czasowym horyzoncie planowania: $H = \langle 1, 7 \rangle$ oraz przy terminach dostępności frontów robót określonych w tabeli 2.

Przykład rozwiązany zostanie w aspekcie **analizy możliwości wykonania zadań** poprzez określenie ilości (w tym badania dostępności) potrzebnych zasobów. Jednocześnie dokonana zostanie ocena stopnia dopasowania realizatora do realizacji zadań w ramach frontów robót przez pryzmat kosztów strat z tytułu niepełnego wykorzystania zasobów podczas realizacji tych frontów.

Stan wyjściowy w zakresie potencjału wykonawczego (przed alokacją zasobów) w odniesieniu do zasobów poszczególnych szczebli hierarchii, możliwych do wygenerowania z zasobów podstawowych, zawiera tabela 1. Wartości zawarte w tabeli informują o ilości możliwych do „zbudowania” z zasobów podstawowych określonych typów zasobów złożonych. W tabeli 1 określono także **koszt jednostkowy** związany z niepełnym wykorzystaniem zasobów podstawowych (c_k^{zp}).

TABELA 1

Potencjał wykonawczy, koszty niepełnego wykorzystania zasobów

Z =	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}
Q =	2	3	2	6	5	2	8	4	12	16
Koszt jednostkowy związany z niepełnym wykorzystaniem potencjału zasobu								3	2	1

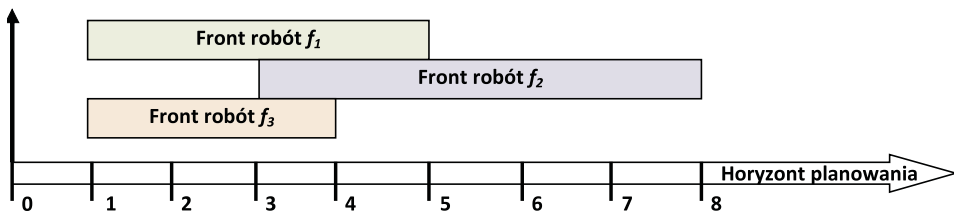
Na podstawie nakładów rzeczowych (macierz \mathbf{N}) odniesionych do struktury zasobów oraz wiadomej ilości jednostek przedmiarowych zadań w ramach poszczególnych frontów robót (macierz \mathbf{K}) — z wykorzystaniem (2) i (3) — obliczona zostaje pracochłonność poszczególnych frontów robót odniesiona do hierarchii struktury (tab. 2). Komórkami zacięniowanymi oznaczono pracochłonność frontów robót obliczoną przez przyzmat zasobów podstawowych — macierz \mathbf{W}' .

TABELA 2

Pracochłonność frontów robót, terminy dyrektywne ich wykonania

Typy zasobów		z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}	Terminy dyrektywne wykonania frontów robót	
Fronty robót		\mathbf{W}							\mathbf{W}			e_j^s	e_j^f
									\mathbf{W}'				
f_1	Pracochłonność frontów robót odniesiona do zasobów niezależnych	0	0	0	0	7	0	0	0	4	3	1	5
									0	11	24		
f_2		0	0	0	4	0	0	2	3	4	4	3	8
								3	14	16			
f_3	0	0	0	2	4	2	0	2	4	4	1	4	
								6	14	20			

Odwzorowanie harmonogramowe realizacji zadań w ramach rozpatrywanych frontów robót w założonym horyzoncie planowania przedstawia rysunek 2. Terminy dostępności frontów robót wyznaczają trzy okresy czasowe, w których wymagania zasobowe są różne. Zakłada się przy tym, że przydział zasobów na fronty robocze jest niezmienny w całym przedziale czasu realizacji tego frontu.



Rys. 2. Odwzorowanie harmonogramowe realizacji zadań w ramach frontów robót

Ilość potrzebnych do wykonania zadań zasobów, rozpatrywana przez przyzmat zasobów podstawowych, w odniesieniu do hierarchii struktury zasobów — wyliczonych według zależności (4), (5) — przedstawia tabela 3. W komórkach zacięniowanych

zaznaczono wartości obrazujące szczebel zasobów bezpośredniego podporządkowania, a więc zasobów, którymi w praktyce najchętniej operuje planista-dowódca.

TABELA 3
Niezbędne zasoby do realizacji frontów robót w terminach dyrektywnych

$Z =$		z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}
		B''									
f_1	Ilości niezależnych jednostek zasobowych niezbędnych do realizacji frontów robót	0,50	1,00	0,00	1,50	2,00	0,00	3,00	0,00	3,00	6,00
f_2		0,50	0,80	0,50	1,50	1,33	0,50	2,00	1,00	3,00	4,00
f_3		1,00	1,40	1,00	2,50	2,33	2,00	3,50	2,00	5,00	7,00

Decyzję planującego w zakresie przydziału zasobów do zadań (macierz X) oraz brakującą (lub nadmiarową) ilość jednostek zasobów podstawowych w stosunku do ilości wymaganej dla realizacji frontu $j: f_j \in F$ w terminie dyrektywnym (macierz U) zawiera tabela 4. Komórkami cieniowanymi zaznaczono decyzję planisty; podkreśloną kursywą — brakujące (lub nadmiarowe) jednostki ze szczebla zasobów podstawowych, które wyliczone zostały według zależności (6), (7).

TABELA 4
Decyzja planisty (macierz X) oraz zasoby brakujące lub nadmiarowe (macierz U)

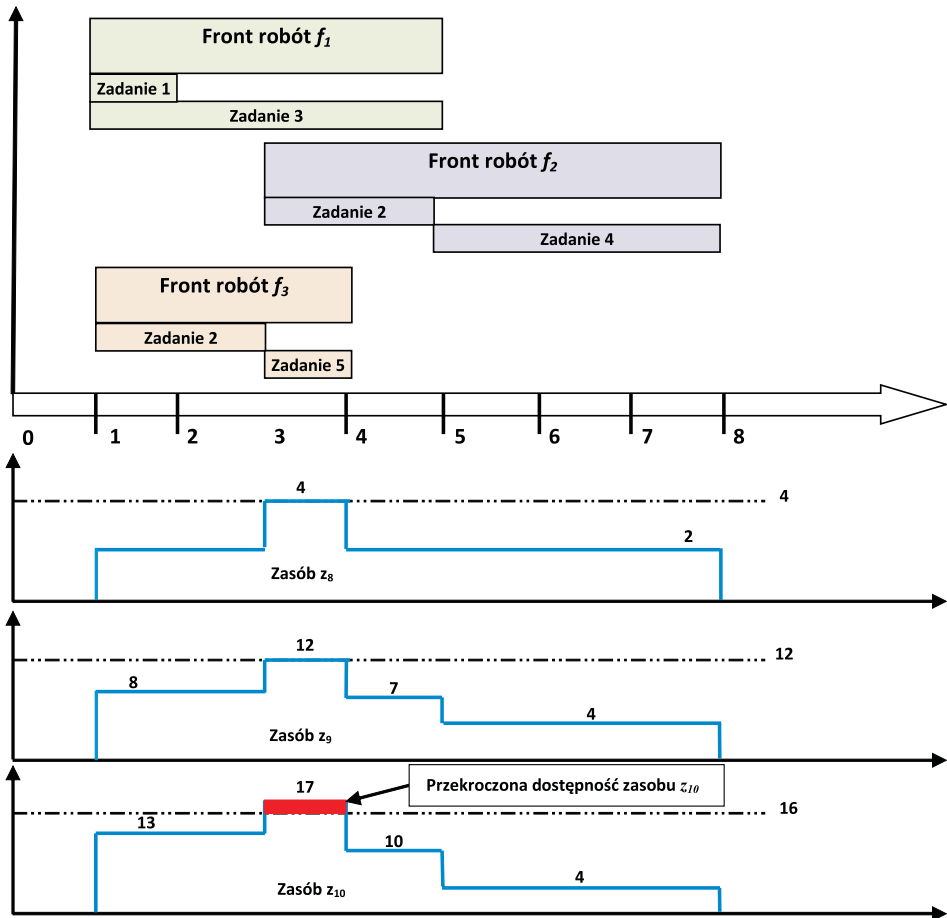
Typy zasobów		$Z =$	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}
Fronty robót		X										
									U			
f_1	Ilości niezależnych jednostek zasobowych niezbędnych do realizacji frontów robót		1									1
f_2		1							<i>-1</i>	<i>-1</i>		
f_3			1	1								

Decyzje planisty są więc następujące:

- do realizacji frontu f_1 przydzielono jeden kompletny wewnętrznie zasób z_2 oraz jeden egzemplarz zasobu z_{10} ;
- do realizacji frontu f_2 przydzielono jeden kompletny wewnętrznie zasób z_1 ;
- do realizacji frontu f_3 przydzielono jeden kompletny wewnętrznie zasób z_2 oraz jeden kompletny wewnętrznie zasób z_3 .

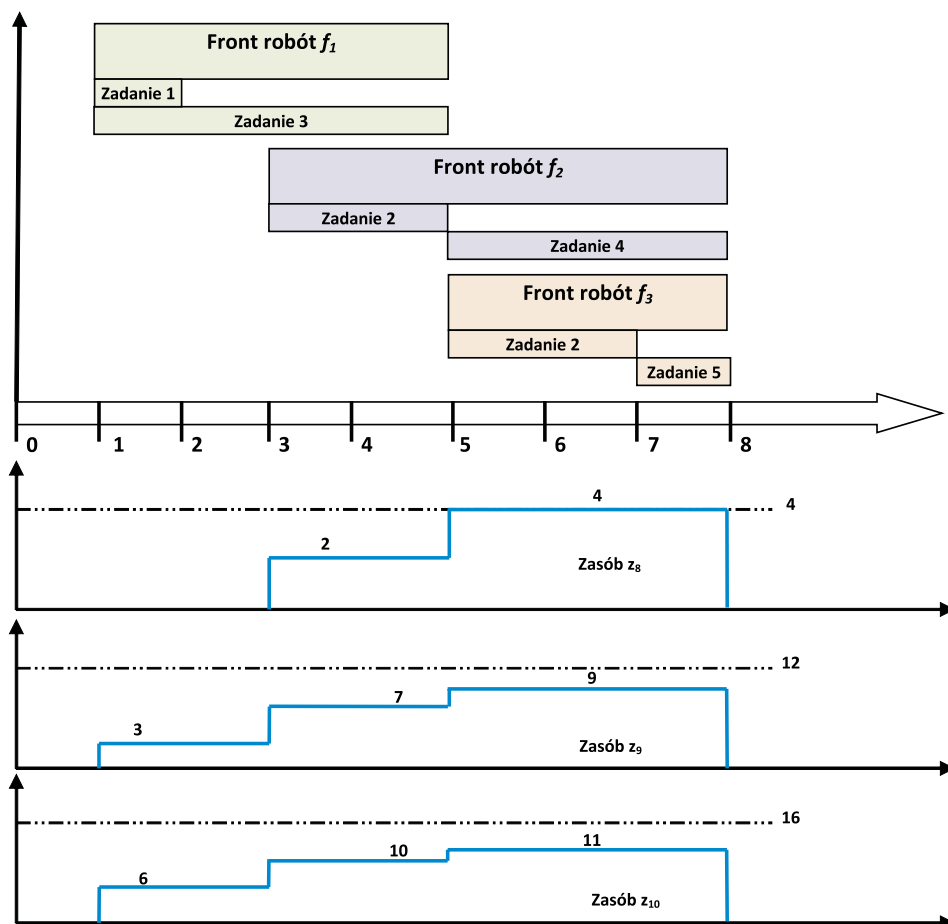
Z tablicy U otrzymujemy informację, że do realizacji frontu robót f_1 i f_3 alokowano dokładnie wymaganą ilość zasobów podstawowych, natomiast do realizacji frontów f_2 skierowano **nadmiarowo** po jednym egzemplarzu zasobu z_8 oraz z_9 .

Jednocześnie z analizy dostępności zasobów wynika, że przy tak postawionych warunkach ograniczających brakuje możliwości wykonania zadań z uwagi na **przekroczenie dostępności** zasobu z_{10} . Harmonogram realizacji frontów robót wraz z wykresem zapotrzebowania na zasoby podstawowe przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Oczekiwany harmonogram realizacji frontów robót. Wykres zapotrzebowania na zasoby podstawowe. Brak dostępności zasobu z_{10}

W tej sytuacji „harmonogram robót” musi ulec weryfikacji. Jednym z rozwiązań może być zmiana terminu dyrektywnego wybranego frontu robót — tak aby nie przekroczyć dostępności zasobów podstawowych. Zweryfikowany pod tym względem harmonogram — ze zmienionym terminem realizacji frontu robót nr 3 — przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Zweryfikowany harmonogram realizacji frontów robót. Wykres zapotrzebowania na zasoby podstawowe

W obu przypadkach, czyli — bez zmiany decyzji co do alokacji zasobów, a jedynie przy zmianie dopuszczalnych terminów dyrektywnych frontów robót — ocena stopnia dopasowania realizatora będzie taka sama. W prezentowanym modelu wyraża ją bowiem koszt strat z tytułu niepełnego wykorzystania zasobów podstawowych w realizacji zadań na poszczególnych frontach robót. Ocenę stopnia dopasowania realizatora na poszczególnych frontach robót, wyliczoną według zależności (9), zawiera tabela 5.

TABELA 5

Ocena dopasowania realizatora — koszty niepełnego wykorzystania zasobów

Zasoby podstawowe		z_8	z_9	z_{10}		
Fronty robót						
f_1	Koszty niewykorzystania zasobów podstawowych w realizacji zadań w ramach frontu robót	0,00	0,50	0,00	Koszty całkowite — odniesione do frontów robót	0,50
f_2		4,20	2,40	0,80		7,40
f_3		0,00	0,67	0,33		1,00

Jak widzimy — przy tak określonej sytuacji decyzyjnej — nie ma możliwości realizacji wszystkich frontów robót w oczekiwanych terminach dyrektywnych. W prezentowanym przykładzie pokazano wybraną „reakcję” planisty na fakt braku dostępności zasobu z_{10} — tj. przesunięcie w czasie realizacji frontu f_3 . W przypadku kiedy wszystkie fronty robót musiałyby być bezwzględnie zrealizowane w terminach dyrektywnych — wymagane byłoby wsparcie realizatora z zewnątrz.

Zaprezentowany przykład, mimo swojej prostoty, wymagał rozwiązania szeregu zagadnień, których kontrolowanie w praktycznym procesie planistyczno-dowodczym bez wspomaganie ze strony aplikacji komputerowej i przy przyjęciu założeń prezentowanego modelu wydaje się niezwykle trudne.

5. Zakończenie

Modelowanie problemu alokacji hierarchicznej struktury zasobów czynnych w planowaniu realizacji przedsięwzięć inżyniersko-budowlanych, o którym traktuje niniejsza praca, jest potrzebne do projektowania komputerowych programów harmonogramowania działań realizowanych tymi strukturami. Pełne rozwiązanie problemu wymaga dodatkowych analiz wynikających głównie z aspektu złożonego charakteru struktury zasobów. Analizy te związane są głównie z problemem kontrolowania dostępności zasobów oraz określenia stanu posiadania zasobów na różnych poziomach hierarchii w poszczególnych jednostkach czasu. Rozwiązywanie poszczególnych zagadnień, składających się na całość uporządkowanej analizy,

stanowi ciągły obszar badań prowadzonych przez Autorów artykułu. Celem analiz jest opracowanie metody planowania działań inżynierskich jednostek o zhierarchizowanych strukturach.

Artykuł wpłynął do redakcji 13.01.2015 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 20.05.2015 r.

LITERATURA

- [1] MARCINKOWSKI R., *Metody rozdziału zasobów realizatora w działalności inżyniersko-budowlanej*, Warszawa, 2002, 77-88.
- [2] MARCINKOWSKI R., *Alokacja hierarchicznych struktur realizatorów w planowaniu wojskowych przedsięwzięć inżynierskich*, Biul. WAT, 45, 7, 1996, 27-36.
- [3] MARCINKOWSKI R., *Zintegrowana analiza kosztów w harmonogramowaniu realizacji zadań inwestycyjnych*, XLVI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Wrocław-Krynica, 2000, t. 3, 179-186.
- [4] JAWORSKI K.M., *Metodologia projektowania realizacji budowy*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1999.
- [5] KASPROWICZ T., *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych*, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom-Warszawa, 2002.
- [6] KASPROWICZ T., *Harmonogramowanie robót inżyniersko-budowlanych z terminowym zapotrzebowaniem niezależnych brygad roboczych*, Biul. WAT, 2, 1994, 125-134.
- [7] HEJDUCKI Z., *Sprzężenia czasowe w metodach organizacji złożonych procesów budowlanych*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Monografie, 34, 2000.
- [8] KRISTOWSKI A., *Modelowanie niepewności w harmonogramowaniu budowy podpór mostów składanych*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2002.
- [9] KLISZEWSKI S., *Metoda wyboru technologii i organizacji niejednorodnych robót ziemnych*, Rozprawa Doktorska, WAT, Warszawa, 1998.
- [10] SEKUNDA R., *Modelowanie pracy zasobów jednostki wykonawstwa budowlanego w aspekcie zintegrowanej analizy kosztów*, XLVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB „KRYNICA 2001”, 16-21.09.2001, t. 3, 333-340.
- [11] SEKUNDA R., *Zarządzanie rozdziałem zasobów złożonych w sytuacjach wyjątkowych*, XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Warszawa-Rynia 18-20 października 2004, 289-298.
- [12] PODOLSKI M., *Analiza nowych zastosowań teorii szeregowania zadań w organizacji robót budowlanych*, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2008.
- [13] PODOLSKI M., *Zarządzanie zasobami w harmonogramowaniu wieloobektowych przedsięwzięć budowlanych z wykorzystaniem teorii szeregowania zadań*, Przegląd Budowlany, 4, 2014, 42-47.

R. SEKUNDA, R. MARCINKOWSKI

Balancing of composite resources in engineering task planning

Abstract. In the article, a problem of balancing of composite resources in engineering task planning is undertaken. Essence of resources structure hierarchy and engineering tasks planning with using composite resources is described. Mathematical model of a performer, tasks structure and model

of chosen topic connected with composite resources allocation is presented. Analysis which is presented in this article is a part of extensive studies connected with a problem of composite resources management.

Keywords: construction, composite resources, decision support, resource management

DOI: 10.5604/12345865.1168728