

Marcin Klimek\*, Piotr Łebkowski\*\*

## **Alokacja zasobów dla problemu harmonogramowania projektu z ważonymi kosztami niestabilności**

### **1. Wprowadzenie**

Problem odpornej alokacji zasobów dla zagadnienia harmonogramowania projektu z ograniczoną dostępnością zasobów *RCPS* (*Resource-Constrained Project Scheduling*) jest nowym kierunkiem badawczym utworzonym w ostatnich latach w ramach klasycznego modelu *RCPS*. Harmonogramowanie odporne (proaktywne) sprowadza się do tworzenia harmonogramu zadań, który ze względu na swoje właściwości jest niepodatny na zakłócenia (zaburzenia) pojawiające się w trakcie jego realizacji [1]. Zaburzenia produkcyjne powodują m.in. zmiany czasów trwania zadań i destabilizują przebieg produkcji. Wskazane jest stworzenie takiego planu realizacji zadań, w którym w wyniku uwzględnienia potencjalnych zakłóceń w produkcji minimalizowana jest liczba zmian (np. terminów rozpoczęcia zadań, rozdziałów zasobów) w harmonogramie podczas jego wykonania.

Jednym z etapów optymalizacyjnych proaktywnego harmonogramowania projektu, które mogą zwiększyć odporność harmonogramu, jest alokacja zasobów. W tym artykule przedstawione są zagadnienia związane z przydziałem zasobów do czynności i wpływem tej alokacji na odporność harmonogramu dla problemu harmonogramowania projektu z ograniczonymi zasobami z ważonymi kosztami niestabilności poszczególnych zadań.

### **2. Sformułowanie problemu harmonogramowania projektu z ważonymi kosztami niestabilności**

Problem harmonogramowania projektu z ważonymi kosztami niestabilności to zmodyfikowany model konwencjonalnego, grafowego problemu *RCPS* rozpatrywany podczas planowania projektu w warunkach niepewności [2–5].

---

\* PSW Białą Podlaska, Instytut Informatyki

\*\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Katedra Badań Operacyjnych i Technologii Informatycznych

Do reprezentacji projektu (przedsięwzięcia) w *RCPS* stosowana jest sieć *AON* (*Activity On Node*) [2]. *AON* to acykliczny, spójny, prosty graf skierowany  $G(V, E)$ , w którym  $V$  to zbiór węzłów odpowiadających zadaniom (czynnościom) realizowanym w projekcie, a  $E$  to zbiór łuków reprezentujących relacje kolejnościowe między zadaniami. Zbiór  $V$  zawiera  $n+2$  zadań ponumerowanych od 0 do  $n+1$  w porządku topologicznym, tzn. poprzednik ma numer niższy od następnika. Zadania 0 i  $n+1$  to czynności pozorne o zerowych czasach trwania i zerowym zapotrzebowaniu na zasoby, będące odpowiednio wierzchołkiem początkowym oraz wierzchołkiem końcowym grafu  $G(V, E)$ .

Między zadaniami występują relacje kolejnościowe, w których następnik może rozpocząć się bez zwłoki po zakończeniu poprzednika (*finish-start zero-lag precedence*) [2]:

$$s_i + d_i \leq s_j, \quad \forall (i, j) \in E \quad (1)$$

gdzie:

- $s_i$  – planowany czas rozpoczęcia zadania  $i$ ,
- $d_i$  – planowany czas realizacji zadania  $i$ .

Do realizacji zadań niezbędne są zasoby odnawialne, których liczba jest ograniczona i stała a wynosi  $a_k$ . W każdym momencie czasu  $t$  wykorzystanie zasobów nie może przekraczać  $a_k$  [2]:

$$\sum_{i \in A(t)} r_{ik} \leq a_k, \quad \forall t, \forall k \quad (2)$$

gdzie:

- $r_{ik}$  – zapotrzebowanie zadania  $i$  na zasób typu  $k$ ,
- $A(t)$  – zbiór zadań wykonywanych w przedziale czasu  $[t-1, t]$ ,
- $a_k$  – ilość dostępnych zasobów typu  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ; gdzie  $K$  – liczba typów zasobów).

Podczas planowania tworzony jest harmonogram bazowy uwzględniający ograniczenia kolejnościowe i zasobowe, czyli szukane są czasy rozpoczęcia zadań  $s_1, \dots, s_{n+1}$ . W deterministycznym *RCPS* najczęściej stosowaną funkcją celu jest minimalizacja czasu trwania projektu (*makespan*) równego  $s_{n+1}$ .

W trakcie realizacji produkcji planowe rozpoczynanie zadań zgodnie z ustalonym harmonogramem bazowym (nominalnym) często jest niemożliwe ze względu na niepewność występującą w rzeczywistych środowiskach produkcyjnych. W harmonogramowaniu projektu w warunkach niepewności najczęściej przyjmuje się, że wszystkie zakłócenia produkcyjne (np. niekorzystne warunki atmosferyczne, niedostępność zasobów, problemy z dostawami materiałów itp.) wpływają na zmienność czasów trwania zadań. Podobne podejście stosowane jest w tej pracy. Problem proaktywnego harmonogramowania sprowadzany jest do minimalizacji ważonego kosztu niestabilności w warunkach niepewności związanej z zmiennością czasów trwania zadań (w badaniach stosowane są stochastyczne

czasu realizacji zadań [3–5]), przy czym czasy rozpoczęcia zadań  $s_1, \dots, s_{n+1}$  ustalone są na podstawie harmonogramu nominalnego minimalizującego czas trwania projektu:

$$\min \left( \sum_{i=1}^{n+1} w_i \cdot |s_i^R - s_i| \right) \quad (3)$$

gdzie:

- $s_i^R$  – rzeczywisty moment rozpoczęcia zadania  $i$ , w fazie planowania zastępowany jest przez  $E(s_i^R)$ , czyli oczekiwany czas rzeczywistego rozpoczęcia zadania  $i$ ,
- $w_i$  – koszt niestabilności (waga) przypadający na jednostkę czasu związany z opóźnieniem rozpoczęcia zadania  $i$ , koszt ten może być związany z dodatkowymi kosztami organizacyjnymi, z kosztami magazynowania materiałów, z karami umownymi za nieterminowe wykonanie itp.

Dla problemu *RCPS* z funkcją celu określoną wzorem (3) istnieje możliwość analizy problemu *RCPS* pod kątem stabilności (odporności) i wydajności uszeregowania. Przykładowo przyjmując  $w_1, \dots, w_n = 0$  oraz  $w_{n+1} \neq 0$  – problem sprowadza się do terminowej realizacji całego projektu (kryterium wydajnościowe), natomiast przyjmując  $w_1, \dots, w_n = w_{n+1} \neq 0$  – problem sprowadza się do zabezpieczenia wszystkich zadań przed możliwymi zakłóceniami (kryterium stabilności harmonogramu) [4–5].

Dla problemu *RCPS* z ważonymi kosztami niestabilności określane są wagi przypisane poszczególnym zadaniom. W badaniach wagi generowane są w sposób losowy, przy czym większa waga ustalana jest dla czynności końcowej (np. dziesięciokrotnie [3–5]) ze względu na przyjęcie założenia, że największe znaczenie ma dotrzymanie terminu realizacji całego projektu równego  $s_{n+1}$ .

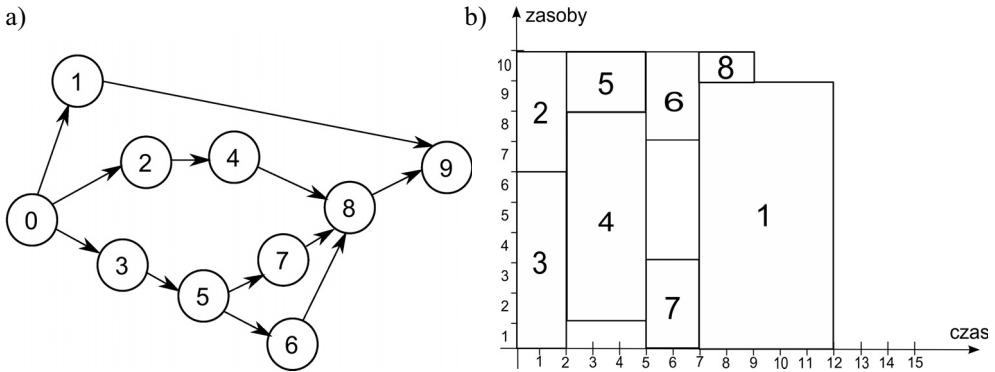
W tabeli 1 umieszczone są dane o przykładowym projekcie analizowanym w dalszej części pracy.

**Tabela 1**  
Przykładowy projekt złożony z 10 zadań

Nr zadania $i$	Czas trwania $d_i$	Bezpośrednie następniki zadania $i$	Zapotrzebowanie na zasób $r_i$	Koszt niestabilności (waga) $w_i$
0	0	1, 2, 3	0	0
1	5	9	9	5
2	2	4	4	3
3	2	5	6	4
4	3	8	7	4
5	3	6, 7	2	6
6	2	8	3	8
7	2	8	3	2
8	2	9	1	10
9	0	–	0	50

Przykładowy projekt składa się z 10 zadań (w tym dwóch pozornych z numerami 0 i 9). Realizowany jest przez jeden typ zasobu o liczbie dostępnych zasobów wynoszącej 10. Graf z relacjami kolejnościowymi dla analizowanego projektu przedstawiony jest na rysunku 1a.

Dla projektu zdefiniowanego w tabeli 1 minimalny czas jego realizacji wynosi 12 j.cz. Wykres Gantta dla uszeregowania z minimalnym czasem trwania przedsięwzięcia przedstawiony jest na rysunku 1b.



**Rys. 1.** Graf z relacjami kolejnościowymi dla analizowanego projektu (a), wykres Gantta dla uszeregowania bazowego zadań z minimalnym czasem trwania realizowanego projektu (b)

### 3. Sformułowanie problemu alokacji zasobów

Dla ustalonego harmonogramu nominalnego (określonych czasów rozpoczęcia zadań  $s_1, \dots, s_{n+1}$ ) może istnieć wiele różnych alokacji zasobów, które różnią się między sobą odpornością na zakłócenia produkcyjne. Problem przydziału zasobów do zadań dla problemu RCPS jest zadaniem silnie NP-trudnym, już przy jednym typie zasobów [4].

Do opisu problemu przydziału zasobów stosowana jest sieć przepływu zasobów (*resource flow networks*) [6], składająca się z łuków z oryginalnej sieci czynności  $G(V, E)$  oraz z łuków dodatkowych (zbiór  $E_R$ ). W sieci przepływu zasobów znajdują się wszystkie pary węzłów (czynności), między którymi występują przepływy zasobów  $f(i, j, k)$ , określające liczbę przekazywanych zasobów dla każdego typu zasobu  $k$  od kończącego się zadania  $i$  do rozpoczynanego zadania  $j$ . Zbiór łuków dodatkowych  $E_R$  zawiera tylko te łuki, które nie występują w oryginalnej sieci  $G(V, E)$ .

Ograniczenia dla problemu alokacji zasobów formułowane są następująco [3, 5]:

- suma wszystkich zasobów danego typu wychodzących z pozornej czynności początkowej 0 jest równa sumie tych zasobów wchodzących do pozornej czynności końcowej  $n+1$  i wynosi  $a_k$  (dla każdego typu zasobu  $k$ ):

$$\sum_{j \in V} f(0, j, k) = \sum_{j \in V} f(j, n+1, k) = a_k, \quad \forall k \in K \quad (4)$$

- suma wszystkich zasobów danego typu wchodzących do danego węzła, reprezentującego czynność niepozorną, jest równa sumie tych zasobów wychodzących z tego węzła i wynosi  $r_{ik}$  (dla każdego typu zasobu  $k$ ):

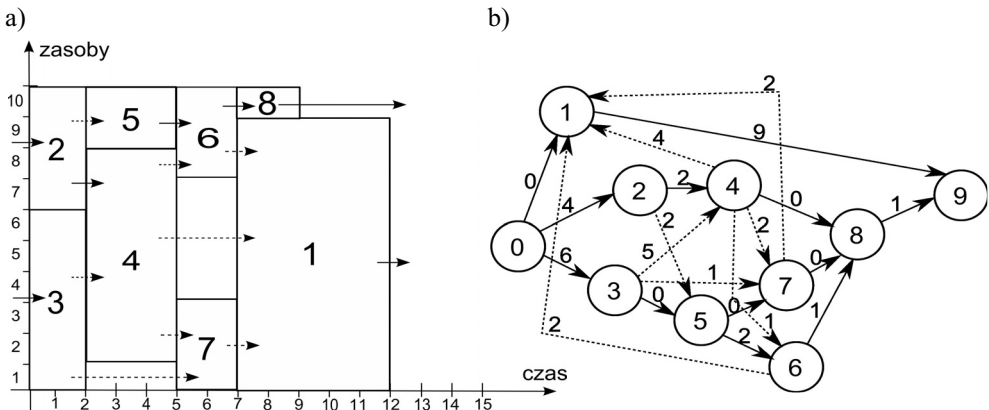
$$\sum_{j \in V} f(i, j, k) = \sum_{j \in V} f(j, i, k) = r_{ik}, \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\}, \forall k \in K \quad (5)$$

W badaniach dotyczących alokacji zasobów rozważany jest problem odpornego rozdziału zasobów, który sprowadzany jest do zagadnienia minimalizacji liczby łuków dodatkowych [3–5, 7] (każdy dodatkowy łuk w zbiorze  $E_R$  to nowe ograniczenie kolejnościowe, które zmniejsza odporność harmonogramu). W tym celu przydziela się czynności, między którymi są zależności kolejnościowe, do realizacji przez te same zasoby [7] lub/i dąży się do maksymalizacji sumy przepływów między poszczególnymi zadaniami [3–4].

#### 4. Miary odporności alokacji zasobów

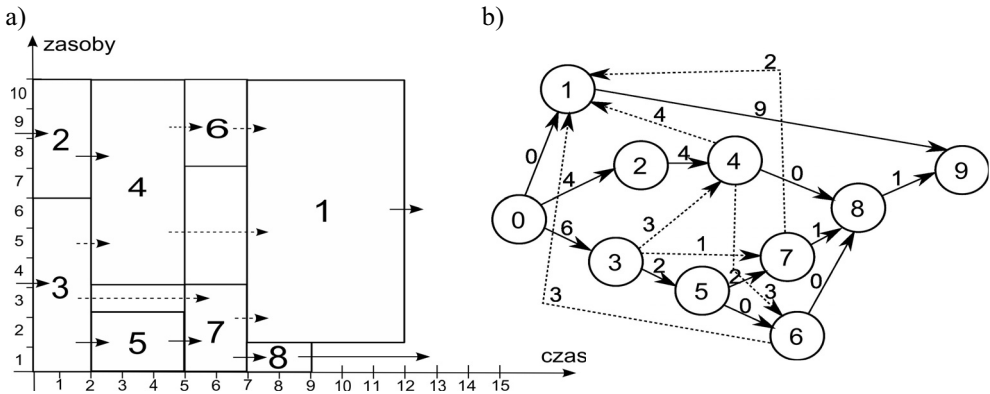
Przy ocenie odporności rozdziału zasobów do czynności analizowana jest sieć przepływu zasobów. Jako miarę odporności alokacji zasobów stosuje się wskaźnik elastyczności *flex* (*flexibility*) [7]. Wartość wskaźnika *flex* jest liczona jako stosunek liczby par zadań w sieci przepływu zasobów, między którymi nie ma relacji poprzedzeń do wszystkich możliwych par zadań w projekcie. Im wyższa wartość *flex*, tym mniejszy stopień zależności między czynnościami i większa odporność uszeregowania. Brak zależności między dwoma zadaniami jest korzystny, gdyż ewentualne opóźnienie zakończenia jednego zadania nie ma wpływu na moment rozpoczęcia drugiego zadania. Problem maksymalizacji wskaźnika *flex* jest równoważny z zagadnieniem minimalizacji liczby łuków dodatkowych.

Na rysunku 2a przedstawiony jest harmonogram z przykładową alokacją zasobów dla analizowanego projektu z tabeli 1. Na rysunku 2b zaprezentowana jest sieć przepływu zasobów z zaznaczonymi (przy strzałkach) przepływami zasobów  $f(i, j)$ .



Rys. 2. Wykres Gantta (a) i sieć przepływu zasobów (b) dla przykładowej alokacji zasobów

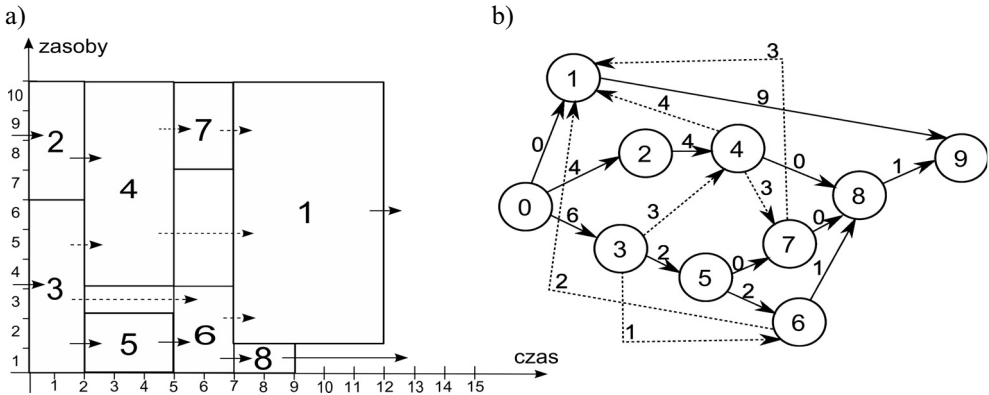
Na rysunku 2 przerywanymi strzałkami oznaczone są dodatkowe łuki (tworzące zbiór  $E_R$ ) powstałe w sieci projektu w wyniku rozdziału zasobów do czynności. Dla sieci przepływu zasobów z rysunku 2 zbiór łuków dodatkowych  $E_R$  składa się z ośmiu łuków: (2,5), (3,4), (3,7), (4,1), (4,6), (4,7), (6,1), (7,1). Część z łuków dodatkowych to tzw. łuki nieuniknione. Łuk  $(i, j)$  jest nieunikniony, jeśli dla danego harmonogramu nominalnego liczba dostępnych zasobów danego typu  $k$  (nieuwzględniając zasobów, które zrealizowały czynność  $i$ ), w momencie rozpoczynania zadania  $j$  ( $t = s_j$ ), jest mniejsza niż zapotrzebowanie na zasoby zadania  $j$  [3–4]. Łuki nieuniknione dla harmonogramu bazowego z rysunku 1b to: (3,4), (4,1), (6,1), (7,1). Łuki (2,5), (3,7), (4,6) i (4,7) można teoretycznie usunąć ze zbioru  $E_R$  przy innym rozdziale zasobów. Minimalna liczba elementów w zbiorze  $E_R$  wynosi jednak 6. Możliwa jest alokacja zasobów z eliminacją łuku (2,5) oraz łuku (4,6) lub (4,7). Usunięcie łuku (3,7) z równoczesnym przydziałem zasobów bez łuku dodatkowego (2,5) prowadzi do powstania łuku dodatkowego (3,6) lub (3,1) i nie zmniejsza rozmiaru zbioru  $E_R$ . Na rysunku 3 przedstawiony jest harmonogram z przykładową alokacją zasobów z minimalną liczbą łuków dodatkowych.



**Rys. 3.** Wykres Gantta (a) i sieć przepływu zasobów (b) dla przykładowej alokacji zasobów z minimalną liczbą łuków dodatkowych

Dla ustalonego harmonogramu nominalnego może istnieć wiele alokacji zasobów o identycznej liczbie łuków dodatkowych (o identycznej wartości wskaźnika *flex*), które różnią się jakością dla rozważanego problemu minimalizacji ważonego kosztu niestabilności z funkcją celu określoną wzorem 3. Wskaźnik *flex* nie uwzględnia m.in. informacji o kosztach niestabilności zadań. Uwzględniając wiedzę o kosztach niestabilności (wagach) korzystniejsza jest alokacja zasobów z usunięciem łuku dodatkowego (4,6) niż łuku (4,7), ponieważ zadanie 7 ma przypisany mniejszy koszt niestabilności niż zadanie 6 (opóźnienie rozpoczęcia zadania 7 spowodowane wydłużeniem zadania 4 będzie mniej kosztowne niż opóźnienie zadania 6).

Na rysunku 4 przedstawiony jest harmonogram z przykładową alokacją zasobów uwzględniającą koszt niestabilności poszczególnych zadań, z usuniętym łukiem (4,6).



**Rys. 4.** Wykres Gantta (a) i sieć przepływu zasobów (b) dla przykładowej alokacji zasobów z uwzględnieniem kosztów niestabilności poszczególnych zadań

Alokacja zasobów dla problemu harmonogramowania projektu z minimalizacją ważonego kosztu niestabilności musi brać pod uwagę wagi przypisane poszczególnym czynnościom. Jednym z możliwych podejść jest ustalenie wpływu wydłużenia poszczególnych czynności na stabilność produkcji. Ważony koszt niestabilności (wartość funkcji celu określonej wzorem (3)) ustalany jest eksperymentalnie przy zastosowaniu różnych przebiegów produkcji generowanych na podstawie wiedzy statystycznej o czasach trwania zadań [3–5]. W każdym przebiegu losowane są czasy trwania zadań, każdy z rozkładu  $\beta$  o określonych w eksperymencie parametrach. Stosowanie takiej symulacyjnie wyznaczonej funkcji celu jest czasochłonne i zależy od parametrów symulacyjnych (zakłóceń), których generowanie przed realizacją harmonogramu obarczone jest niepewnością. Nie zawsze dostępna jest wiedza statystyczna dotycząca zaburzeń produkcyjnych. Zadania często wydłużane są z przyczyn niemożliwych do przewidzenia w fazie planowania, tj. błędy oszacowania czasu trwania, niekorzystne warunki atmosferyczne, awarie itp. W związku z tym uzasadnione jest opracowanie miar alokacji zasobów wyznaczanych statycznie, które uwzględniają wpływ wydłużeń poszczególnych zadań na koszty niestabilności produkcji [8–9].

Proponowanym przez autorów miernikiem odporności jest wskaźnik *stab* liczony jako suma ważonych kosztów niestabilności wyznaczonych przy założeniu, że każdorazowo jedna z czynności  $j$  (rozważane kolejno wszystkie czynności  $j = 1 \dots n$ ) jest wydłużona o 1 j.cz. (pozostałe zadania mają czasy trwania identyczne z planowanymi):

$$stab = \sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^{n+1} [w_i \cdot (s_i^j - s_i)] \right\} \quad (6)$$

gdzie  $s_i^j$  – czas rozpoczęcia zadania  $i$  przy wydłużeniu zadania  $j$  o 1 j.cz.

Harmonogram o alokacji zasobów z minimalną wartością *stab* jest odporny na zakłócenia. Przy takiej alokacji ewentualne nieznaczne wydłużenia czynności mają mniejszy

wpływ na koszt niestabilności realizowanego uszeregowania (opóźnienia innych zadań). Przy wyliczaniu wskaźnika *stab* można również przyjąć, że dłuższe zadania wykazują się większą zmiennością bezwzględną. Stosowana musi być wtedy procentowa modyfikacja czasów trwania zadań – analizowane poszczególne zadania nie są wydłużane o 1 j.cz., ale o określone  $m\%$ :  $d_j = d_j \cdot (1+m\%)$ .

Przykładowe obliczenia:

- 1) Dla alokacji zasobów z rysunku 3 czasy rozpoczęcia  $s_i^j$  inne niż planowane  $s_i$ :
- przy wydłużeniu zadania 1 o jedną j.cz.:  $s_9^1=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 2 o jedną j.cz.:  $s_4^2=3, s_6^2=6, s_8^2=8, s_1^2=8, s_9^2=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 3 o jedną j.cz.:  $s_4^3=3, s_5^3=3, s_6^3=6, s_7^3=6, s_8^3=8, s_1^3=8, s_9^2=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 4 o jedną j.cz.:  $s_6^4=6, s_8^4=8, s_1^4=8, s_9^4=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 5 o jedną j.cz.:  $s_6^5=6, s_7^5=6, s_8^5=8, s_1^5=8, s_9^5=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 6 o jedną j.cz.:  $s_8^6=8, s_1^6=8, s_9^6=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 7 o jedną j.cz.:  $s_8^7=8, s_1^7=8, s_9^7=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 8 o jedną j.cz.: brak opóźnionych czynności.

Na podstawie wartości  $s_i^j$  i wag poszczególnych zadań wskaźnik *stab* wynosi:

$$stab = 6 \cdot 5 + 2 \cdot 4 + 1 \cdot 6 + 4 \cdot 8 + 2 \cdot 2 + 6 \cdot 10 + 7 \cdot 50 = 490.$$

- 2) Dla alokacji zasobów z rysunku 4 czasy rozpoczęcia  $s_i^j$  inne niż planowane  $s_i$ :
- przy wydłużeniu zadania 1 o jedną j.cz.:  $s_9^1=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 2 o jedną j.cz.:  $s_4^2=3, s_7^2=6, s_8^2=8, s_1^2=8, s_9^2=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 3 o jedną j.cz.:  $s_4^3=3, s_5^3=3, s_6^3=6, s_7^3=6, s_8^3=8, s_1^3=8, s_9^2=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 4 o jedną j.cz.:  $s_7^4=6, s_8^4=8, s_1^4=8, s_9^4=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 5 o jedną j.cz.:  $s_6^5=6, s_7^5=6, s_8^5=8, s_1^5=8, s_9^5=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 6 o jedną j.cz.:  $s_8^6=8, s_1^6=8, s_9^6=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 7 o jedną j.cz.:  $s_8^7=8, s_1^7=8, s_9^7=13$ ,
  - przy wydłużeniu zadania 8 o jedną j.cz.: brak opóźnionych czynności.

Na podstawie wartości  $s_i^j$  i wag poszczególnych zadań wskaźnik *stab* wynosi:

$$stab = 6 \cdot 5 + 2 \cdot 4 + 1 \cdot 6 + 4 \cdot 2 + 2 \cdot 8 + 6 \cdot 10 + 7 \cdot 50 = 478.$$

Obliczenia potwierdziły, że zastosowanie miernika *stab* jest wskazane. Sieci przepływu zasobów z alokacjami zasobów przedstawionymi na rysunkach 3 i 4 mają identyczną liczbę łuków dodatkowych równą 6 i nie są rozróżniane przy użyciu wskaźnika elastyczności *flex*. Natomiast ocena alokacji za pomocą miernika *stab* wskazuje, że preferowana jest alokacja zasobów zaprezentowana na rysunku 4 (niższa wartość *stab*), która jest korzystniejsza dla problemu harmonogramowania projektu z minimalizacją ważonego kosztu niestabilności.



## 5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano zagadnienie przydziału zasobów dla problemu harmonogramowania projektu z ograniczoną dostępnością zasobów z ważonymi kosztami niestabilności poszczególnych zadań. Skoncentrowano się na określeniu kryteriów oceny sieci przepływu zasobów, które mogą być bardziej użyteczne niż stosowane dotąd w badaniach miary odporności. Zaproponowano wskaźnik odporności *stab*, który uwzględnia więcej właściwości alokacji zasobów niż stosowany w badaniach wskaźnik elastyczności. Przy tym jest mniej czasochłonny obliczeniowo i niezależny od losowania niż wskaźniki stabilności wyznaczane symulacyjnie.

Podjęte zagadnienie jest aktualne. Liczba prac dotyczących odpornej alokacji zasobów, zwłaszcza w języku polskim, jest niewielka, a zagadnienie jest istotne z praktycznego punktu widzenia.

Przedmiotem dalszych badań będzie m.in. opracowanie skutecznych algorytmów dla zaproponowanych miar odporności.

## Literatura

- [1] Jensen M.T., *Improving robustness and flexibility of tardiness and total flow-time job shops using robustness measures*. Applied Soft Computing, 1, 2001, 35–52.
- [2] Herroelen W., De Reyck B., Demeulemeester E., *Resource constrained scheduling: a survey of recent developments*. Computers and Operations Research, 25, 1998, 279–302.
- [3] Deblaere F., Demeulemeester E.L., Herroelen W.S., Van De Vonder S., *Proactive resource allocation heuristics for robust project scheduling*. Raport badawczy KBI\_0608, K.U.Leuven, 2006.
- [4] Leus R., *The generation of stable project plans*. Katolicki Uniwersytet Lowański, Belgia, Leuven, Katholieke Universiteit Leuven, Belgia, 2003 (praca doktorska).
- [5] Leus R., Herroelen W., *Stability and resource allocation in project planning*. IIE Transactions, 36(7), 2004, 667–682.
- [6] Artigues C., Michelon P., Reusser S., *Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling*. European Journal of Operational Research, 149(2), 2003, 249–267.
- [7] Policella N., Oddi A., Smith S., Cesta A., *Generating robust partial order schedules*. [w:] Proceedings of CP2004, Toronto, Canada, 2004.
- [8] Klimek M., Łebkowski P., *Algorytmy odpornej alokacji zasobów dla problemu harmonogramowania projektu z ograniczoną dostępnością zasobów*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 13, z. 2, 2009, 371–379.
- [9] Klimek M., Łebkowski P., *Resource allocation for robust project scheduling*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, vol. 59, No. 1, 2011, 51–55.