

# REAKTYWNE HARMONOGRAMOWANIE PROJEKTU <sup>1</sup>

Marcin KLIMEK, Piotr ŁEBKOWSKI

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia reaktywnego harmonogramowania projektu z ograniczoną dostępnością zasobów. Zaprezentowano podejścia wykorzystywane przy planowaniu projektu w warunkach niepewności. Szerzej omówiono reaktywne harmonogramowanie. Opisano wybrane algorytmy reharmonogramowania projektu stosowane w badaniach.

**Słowa kluczowe:** reaktywne harmonogramowanie projektu, reharmonogramowanie, zakłócenia produkcyjne.

## 1. Wprowadzenie

Wykorzystanie teoretycznych problemów szeregowania zadań w praktyce często jest utrudnione, w związku z niepewnością występującą w systemach rzeczywistych. Coraz większe praktyczne znaczenie zyskują algorytmy uwzględniające dynamikę systemów produkcyjnych w zmieniającym się otoczeniu. Jednym z ważnych podejść stosowanych do ograniczania wpływu niepewności jest harmonogramowanie predyktywno-reaktywne [1] (ang. *predictive-reactive scheduling*). Podczas planowania produkcji w fazie predyktywnej stosowane jest podejście proaktywne (ang. *proactive scheduling*), w którym tworzy się harmonogram odporny (ang. *robust schedule*) na działanie możliwych zakłóceń produkcyjnych. Jednak mimo uodpornienia uszeregowania, w trakcie realizacji produkcji pojawiają się nieprzewidywalne zakłócenia, które powodują, że dane uszeregowanie jest już niewydajne lub niemożliwe do zrealizowania. Stosowane jest wtedy harmonogramowanie reaktywne (ang. *reactive scheduling*), które sprowadza się do rewizji i ewentualnej zmiany realizowanego harmonogramu predyktywnego w odpowiedzi na pojawiające się zaburzenia. Modyfikacja istniejącego uszeregowania zadań tzw. reharmonogramowanie [1] (ang. *rescheduling*), może rozwiązać konflikty występujące w aktualnym harmonogramie np. związane z niedostępnością zasobów lub z awarią maszyny. Wykorzystanie podejścia reaktywnego stwarza możliwość wykorzystania szans uzyskania bardziej efektywnego harmonogramu pojawiających się w trakcie produkcji w związku np. ze zwiększeniem się dostępności zasobu, z zakupem nowej maszyny.

W niniejszej pracy przedstawione jest zagadnienie harmonogramowania reaktywnego dla często podejmowanego w ostatnich latach problemu harmonogramowania projektu z ograniczonymi zasobami *RCPSP* [2, 3, 4] (ang. *Resource Constrained Project Scheduling Problem*). Duże zainteresowanie harmonogramowaniem projektu jest związane z coraz większą liczbą zleceń produkcyjnych prowadzonych w ramach projektów (przedsięwzięć) konstruowanych na zlecenie klienta (ang. *MTO – Make-To-Order, ETO – Engineer-To-Order*). W ramach produkcji na zamówienie *MTO* wykonywane są wyroby niestandardowe dla odbiorcy indywidualnego, którego wymagania są zmienne i bywają nieprzewidywalne. Każde takie zlecenie produkcyjne traktowane jest jako osobny projekt realizowany w konsultacji z klientem.

---

<sup>1</sup> Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki (nr projektu: N N519 645940)

## 2. Harmonogramowanie projektu w warunkach niepewności

W trakcie realizacji projektu konsultowanego z klientem występuje duża niepewność związana ze zmiennością wymagań dotyczących produktów, z koniecznością dostosowywania się do zmieniających oczekiwań klientów itp. Występują także nieprzewidywalne zdarzenia zakłócające wykonywanie zadań produkcyjnych np. awarie maszyn, opóźnienia w dostawach materiałów, niekorzystne warunki atmosferyczne, błędy oszacowania czasów wykonania zadań itp., które powodują, że planowane harmonogramy stają się niewydajne lub niemożliwe do zrealizowania i konieczne jest stosowanie reharmonogramowania.

Zakłócenia produkcyjne są źródłem niepewności w harmonogramowaniu zadań. Ich obecność w rzeczywistych systemach produkcyjnych przyczynia się do konieczności wprowadzania zmian w planowanym uszeregowaniu, stąd zwane są czynnikami reharmonogramowania (ang. *rescheduling factors*). Zakłócenia produkcyjne powinny być uwzględniane w każdej fazie produkcji, aby usprawnić realizację zadań.

W harmonogramowaniu przedsięwzięć są rozpatrywane zakłócenia charakterystyczne dla zagadnień projektowych [5]. Stosowany jest następujący podział zakłóceń realizacji projektów:

- dotyczące czynności (zmiany w czasie trwania czynności w trakcie realizacji harmonogramu, opóźnienie rozpoczęcia czynności związane np. z nieterminowym dostarczeniem materiałów przez poddostawców, zmiany zapotrzebowania na zasoby poszczególnych czynności),
- dotyczące zasobów (czasowa niedostępność zasobu np. awaria maszyny, stałe zwiększenie lub zmniejszenie dostępności zasobu),
- dotyczące terminów realizacji (zmiana terminu realizacji projektu, zmiana terminu realizacji etapów projektu).

W harmonogramowaniu projektu najczęściej podejmowany jest problem niepewności związanej z czasami trwania czynności [2, 3, 4]. Zakłada się bowiem, że wpływ wszystkich innych rodzajów zakłóceń sprowadza się do zmienności czasów trwania (np. niekorzystne warunki atmosferyczne, niedostępność zasobów, problemy z dostawami materiałów itp. powodują wydłużenie czasu wykonania zadań). Problem harmonogramowania w warunkach niepewności analizowany jest wtedy jako zagadnienie minimalizacji wpływu możliwych zmian w czasach realizacji zadań.

Harmonogramowanie produkcji w warunkach niepewności sprowadza się do uwzględnienia możliwych zakłóceń produkcyjnych. Zasadniczo wyróżnia się dwa podejścia do tego problemu:

- harmonogramowanie dynamiczne,
- harmonogramowanie predyktywno-reaktywne.

W środowiskach o bardzo dużej zmienności pomijana jest faza planowania i stosowane jest podejście określane jako tzw. dynamiczne harmonogramowanie (ang. *dynamic scheduling*). W dynamicznym szeregowaniu zadań nie tworzy się harmonogramów. Przydzielanie zadań do odpowiednich zasobów (maszyn) odbywa się w chwili, w której zasób (maszyna) jest gotowy do przetwarzania nowego zadania, przy zastosowaniu prostych reguł priorytetowania zadań.

W harmonogramowaniu predyktywno-reaktywnym występują dwa etapy, często funkcjonujące w badaniach jako odrębne, ale w rzeczywistych systemach ich wykorzystanie powinno być łączne [1]:

- etap harmonogramowania predyktywnego – związany z etapem planowania,
- etap harmonogramowania reaktywnego – związany z etapem realizacji planu produkcji.

W fazie planowania produkcji tworzony jest harmonogram predyktywny. Po stworzeniu planu, w trakcie realizacji produkcji w rzeczywistych systemach produkcyjnych, konieczne jest monitorowanie procesu produkcyjnego, w celu reagowania na zdarzenia zakłócające harmonogram predyktywny. W tej fazie, zwanej harmonogramowaniem reaktywnym, wprowadzane są zmiany w harmonogramie, które pozwalają rozwiązać problemy występujące w bazowym harmonogramie związane np. z awarią maszyny.

Realizacja zlecenia produkcyjnego przy zastosowaniu podejścia predyktywno-reaktywnego składa się z faz, takich jak:

- faza planowania – określenie zadań i ich czasów trwania, zasobochłonności, ustalenie relacji kolejnościowych między czynnościami, ustalenie terminów realizacji całego projektu i poszczególnych etapów tzw. kamieni milowych determinujących harmonogram zadań powstający w fazie harmonogramowania;
- faza harmonogramowania – ustalenie czasów rozpoczęcia (i zakończenia) czynności realizujących dany projekt oraz określenie alokacji poszczególnych zasobów do tych czynności, w tej fazie harmonogramowanie predyktywne: nominalne i odporne;
- faza realizacji, kontroli – monitorowanie przede wszystkim terminowej realizacji umownych etapów projektu, przy jednoczesnym zachowaniu stabilności harmonogramu predyktywnego, w tej fazie harmonogramowanie reaktywne w odpowiedzi na pojawiające się zakłócenia produkcyjne;
- faza oceny – po wykonaniu projektu ocena zrealizowanego uszeregowania np. przez porównanie z optymalnym harmonogramem ex-post.

W fazie harmonogramowania predyktywnego ustalone są czasy rozpoczęcia zadań (uwzględniające rozmieszczenie buforów czasowych) oraz przydział zasobów do zadań. W trakcie produkcji w rzeczywistych systemach produkcyjnych, często występują jednak problemy z planową realizacją harmonogramu proaktywnego (odpornego). Zdolność do absorpcji zaburzeń produkcyjnych harmonogramu powstałego w fazie planowania jest ograniczona. Odporna alokacja buforów i zasobów nie są w stanie zabezpieczyć przed wszystkimi możliwymi zakłóceniami. Konieczne jest wprowadzanie zmian w uszeregowaniu na bieżąco w trakcie produkcji, w fazie zwanej harmonogramowaniem reaktywnym. Zmiany te pozwalają rozwiązać problemy wynikające m.in. z błędnych oszacowań czasów trwania czynności, z czasowej niedostępności zasobów (awarie) itp. W rozpatrywanym zagadnieniu celem harmonogramowania reaktywnego jest zachowanie stabilności systemu produkcyjnego i dotrzymanie umownych terminów realizacji kamieni milowych.

### **3. Harmonogramowanie reaktywne**

Podczas harmonogramowania reaktywnego dokonywane są zmiany w realizowanym harmonogramie predyktywnym w odpowiedzi na pojawiające się zdarzenia, które mogą zaburzyć wydajność systemu lub uniemożliwić realizację tego harmonogramu. Zmiany te mają usprawnić proces produkcji, „naprawić” istniejący plan prac.

W fazie reaktywnego szeregowania zadań do naprawy harmonogramu stosowane są następujące metody [1, 6, 7, 8]:

- reharmonogramowanie z przesunięciem prawostronnym (ang. *right-shift rescheduling*): przesunięcie w prawo na wykresie Gantt'a czynności, które nie mogą być przetwarzane z powodu np. awarii maszyny lub niedoboru materiałów,
- reharmonogramowanie częściowe (ang. *partial rescheduling*): przestawianie tylko tych czynności, które są bezpośrednio lub pośrednio zakłócone w celu minimalizacji zmian w harmonogramie i utrzymania stabilności systemu produkcyjnego,
- regeneracja całego uszeregowania (ang. *complete regeneration*): wszystkie zadania nie rozpoczęte do momentu reharmonogramowania są poddawane procesowi szeregowania; wadą tej metody jest długi czas obliczeń..

Poza określeniem sposobu zmiany uszeregowania konieczne jest określenie momentów, w których należy zmienić harmonogram. Odpowiednia częstotliwość ponownego harmonogramowania ma duży wpływ na wydajność realizowanego uszeregowania zadań. W zależności od przyczyny podejmowania decyzji szeregujących i znaczenia na wpływających zdarzeń, stosuje się następujące taktyki (ang. *rescheduling policies*) [1, 6, 7, 8]:

- reharmonogramowanie periodyczne (ang. *periodic rescheduling*): zmiany w harmonogramie dokonywane są co pewien okres, a nie po każdym zaburzeniu planu produkcji,
- reharmonogramowanie wymuszone zdarzeniami (ang. *event-driven rescheduling*): korekty harmonogramu dokonuje się każdorazowo, gdy nastąpi jego zakłócenie lub zostanie spełniony określony warunek wyzwalający zmianę harmonogramu, zmiana uszeregowania zadań może być odpowiedzią na pojawiające się konflikty czasowe, konflikty zasobów lub jest związana z szansą poprawy kolejności zadań w związku ze zwiększeniem się dostępności zasobu,
- reharmonogramowanie hybrydowe (ang. *hybrid rescheduling*): modyfikacje harmonogramu dokonywane są periodycznie lub wywoływane są szczególnie istotnymi zdarzeniami.

Harmonogramowanie reaktywne to dynamiczny proces decyzyjny, w którym w każdym punkcie decyzyjnym  $t$  (analizowany jest przedział czasowy od 0 do czasu zakończenia ostatniego zadania) podejmowana jest reakcja na zakłócenia, tak aby faktycznie zrealizowany harmonogram  $S^R$  jak najmniej odbiegał od harmonogramu początkowego  $S^0$ . Wykorzystywane są wszystkie informacje dostępne w chwili  $t$ , aby zoptymalizować funkcję celu harmonogramowania reaktywnego. Jeśli w analizowanym momencie  $t$  nie ma nowych zakłóceń realizowany jest harmonogram ustalony w chwili  $t-1$ :  $S^t = S^{t-1}$ .

```

Ustal  $S^0$  //Harm. reaktywne dla harmonogramu predyktynego  $S^0$ 
t = 0

repeat
  Rozpocznij czynności z czasem rozpoczęcia  $s_i^t = t$ 
  t = t + 1
  Sprawdź czy są jakieś zakłócenia (nowe, istotne informacje)
  If (nie ma zakłóceń) then
     $S^t = S^{t-1}$ 
    //realizowany jest harmonogram ustalony w momencie t-1
  else
    Znajdź i zapamiętaj harmonogram o minimalnym koszcie
    niestabilności
    //stosowane są różne algorytmy reharmonogramowania
    //optymalizujące funkcję celu harmonogramowania reaktywnego
until (zrealizowano cały projekt - wszystkie zadania zakończone)

```

Rys. 1. Procedura harmonogramowania reaktywnego

Stosując procedurę harmonogramowania reaktywnego (rysunek 1), w przypadku braku zakłóceń produkcyjnych, harmonogram zrealizowany  $S^R$  jest identyczny z harmonogramem początkowym  $S^0$ . Każde zakłócenie (np. wzrost czasu trwania zadania, awaria) może spowodować zmiany w harmonogramie. Gdy wystąpi zakłócenie, następuje ponowne harmonogramowanie, które ma doprowadzić do minimalizacji funkcji celu harmonogramowania reaktywnego.

Harmonogram  $S^t$  zwany jest harmonogramem projektowanym (ang. *projected schedule*). Tworzony jest po każdym zakłóceniu produkcyjnym, które powoduje konflikt czasowy lub zasobowy. Generowanie nowego harmonogramu (lub zmiana istniejącego) w odpowiedzi na każde zakłócenie może spowodować znaczny wzrost czasu obliczeń wraz ze zwiększaniem się liczby pojawiających się zaburzeń produkcyjnych. Z tego powodu w badaniach opracowywane są algorytmy charakteryzujące się niewielkim czasem obliczeń np. stosujące proste mechanizmy priorytetowania. W każdym punkcie decyzyjnym  $t$  dąży się do planowego rozpoczynania każdego zadania i monitoruje się terminowość realizacji całego projektu.

Przy ustaleniu rzeczywistego momentu rozpoczęcia poszczególnych zadań w harmonogramie  $S^R$  stosowane są różne podejścia wynikające ze specyfiki środowisk produkcyjnych. Rozpatrywane są m.in. następujące dwa przypadki [9]:

1. Możliwe jest rozpoczynanie zadań przed planowanym terminem rozpoczęcia. Przypadek użyteczny dla systemów produkcyjnych, w których rozpoczęcie zadania nie jest zależne od dostarczenia dodatkowych materiałów lub komponentów. Dla tego przypadku podejście predyktynno-reaktywne może być porównywane z harmonogramowaniem dynamicznym.
2. Harmonogramowanie kolejowe (ang. *railway scheduling*) – rozpoczynanie zadań przed planowanym terminem nie jest możliwe. Założenie to wynika z faktu, że rozpoczęcie zadania jest możliwe, gdy dostarczone są materiały niezbędne do jego realizacji, które dostarczane są w systemie dokładnie na czas (ang. *JIT- Just In Time*). Harmonogramowanie kolejowe jest często wykorzystywane przy sterowaniu produkcją z wykorzystaniem harmonogramów. Prowadzi to do lepszej organizacji pracy. Możliwe jest zastosowanie dostaw *JIT*, które niwelują koszty magazynowania materiałów itp.

#### 4. Wybrane algorytmy stosowane w reaktywnym harmonogramowaniu projektu

W badaniach dotyczących reaktywnego harmonogramowania projektu najczęściej wykorzystywane jest reharmonogramowanie wymuszone zdarzeniami tzn. zmiany w planie produkcji są wprowadzane każdorazowo, gdy nastąpi zakłócenie, które powoduje, że aktualny harmonogram nie może być zrealizowany [2, 3, 4, 9, 10, 11].

Często stosowaną procedurą podczas harmonogramowania reaktywnego jest reharmonogramowanie z przesunięciem prawostronnym. W każdym punkcie decyzyjnym generowany jest harmonogram projektowany  $S^t$  przy zastosowaniu tej metody, uwzględniając informacje o czasach trwania zadań w momencie  $t$ . Jako algorytmy reaktywnego harmonogramowania projektów stosowane są także m.in. [9]:

1. harmonogramowanie na podstawie listy priorytetowej (ang. *priority lists scheduling*),
2. procedury próbkowania rozwiązań (ang. *sampling approach*),
3. algorytmy heurystyczne, metaheurystyczne, algorytmy lokalnego przeszukiwania – algorytmy przeszukujące przestrzeń rozwiązań w celu zminimalizowania kosztu niestabilności.

Procedury reaktywne posługują się listą czynności lub listą priorytetową, która jest dekodowana przy użyciu schematów *SGS* (ang. *SGS - Schedule Generation Scheme*). Procedury dekodujące zamieniają listę czynności (lub listę priorytetową) w harmonogram, uwzględniając ograniczenia kolejnościowe i zasobowe. Najczęściej wykorzystywane są dwa schematy generowania harmonogramu [2]: szeregowy (ang. *serial SGS*) oraz równoległy (ang. *parallel SGS*), które są opracowane dla problemu deterministycznego i nie uwzględniają harmonogramu ustalonego w fazie planowania. Podczas reharmonogramowania odpowiedniejsze są odporne schematy generowania harmonogramu: odporny równoległy *SGS* (ang. *robust parallel SGS*) oraz odporny szeregowy *SGS* (ang. *robust serial SGS*). Mają one działanie bardzo zbliżone do reguł harmonogramowania typu online tzw. *dispatching rules*. Jednak, w odróżnieniu do harmonogramowania dynamicznego, przy tworzeniu listy priorytetowej, wykorzystywany jest harmonogram predykcyjny. Odporne schematy generowania harmonogramu projektowanego  $S^t$  działają następująco [2, 9]:

- odporny równoległy *SGS* – działa jak równoległy *SGS* z dodatkowym ograniczeniem, aby nie rozpoczynać czynności przed ich planowym terminem rozpoczęcia wynikającym z harmonogramu predykcyjnego, stosowane jest harmonogramowanie kolejowe,
- odporny szeregowy *SGS* – działa jak szeregowy *SGS* z dodatkowym ograniczeniem, aby rozpoczynać czynności w momencie jak najbardziej zbliżonym do planowego terminu rozpoczęcia wynikającego z harmonogramu predykcyjnego, w odróżnieniu od odpornego równoległego *SGS* możliwe jest rozpoczęcie czynności przed planowanym czasem rozpoczęcia.

Algorytmy reaktywne korzystają z procedur *SGS* do ustalania, która czynność ma się rozpocząć w każdym punkcie decyzyjnym  $t$ . Decyzja jest podejmowana na podstawie wszystkich dostępnych informacji w momencie  $t$ . Harmonogram bieżący  $S^t$  w momencie  $t$  jest tworzony na podstawie listy  $L$  złożonej z czynności posortowanych według określonego priorytetu. Czynności poddane są dekodowaniu przy użyciu *SGS* w kolejności takiej jak występują na liście  $L$ .

#### 4.1. Harmonogramowanie na podstawie listy priorytetowej

W procedurze reaktywnego harmonogramowania na podstawie listy priorytetowej, w każdym punkcie decyzyjnym  $t$  tworzona jest posortowana lista czynności, jeszcze nie rozpoczętych, na podstawie której schematy generowania harmonogramu *SGS* określają, które czynności mają się rozpocząć w danym momencie  $t$ . Stosowane są odporne procedury *SGS* uwzględniające aktualne informacje o zakłóceniach występujących w trakcie realizacji harmonogramu. W momencie  $t$  tworzona jest lista priorytetowa czynności  $L$  jeszcze nie zakończonych, w kolejności wynikającej ze stosowanej reguły priorytetowej. Zadania wybierane kolejno z listy  $L$  są rozpoczynane w najwcześniejszym możliwym terminie rozpoczęcia przy spełnieniu aktualnych ograniczeń zasobowych i kolejnościowych.

Jako reguły priorytetowe, dla potrzeb szeregowania reaktywnego, zastosowane są m.in. następujące reguły [9]:

a) statyczne (nie zmieniające się w trakcie realizacji projektu):

- *EBST* (ang. *Earliest Baseline activity Starting Time*) – posortowanie czynności w kolejności niemalejących ich czasów rozpoczęcia w harmonogramie predykcyjnym  $S^0$ ,
- *LST* (ang. *Latest Starting Time*) – posortowanie czynności w kolejności niemalejących ich najpóźniejszych możliwych czasów rozpoczęcia (najlepsza reguła dla problemu deterministycznego *RCPSP*),
- *LW* (ang. *Largest activity Weight*) – posortowanie czynności w kolejności nierosnących wag im przypisanym (wagi są przypisane wszystkim czynnościom i uwzględniają m.in. koszt opóźnionego jej rozpoczęcia),

b) dynamiczne (zmieniające się w trakcie realizacji projektu, konieczne obliczenia w każdym punkcie decyzyjnym  $t$ ):

- *EPST* (ang. *Earliest Projected Starting Times*) – w momencie  $t$  posortowanie czynności w kolejności niemalejących ich czasów rozpoczęcia w harmonogramie  $S^{t-1}$  powstałym w momencie czasu  $t-1$ ,
- *MC* (ang. *Minimal Cost*) – w momencie  $t$  posortowanie czynności w kolejności rosnących iloczynów  $w_i \cdot (s_i^0 - t)$ , w regule tej gdy  $s_i^0 < t$  wtedy  $w_i \cdot (s_i^0 - t) < 0$ , czyli preferowane są czynności, które już powinny być rozpoczęte, bowiem ich dalsze opóźnianie zwiększa koszt niestabilności.

Celem priorytetowania zadań jest doprowadzenie do możliwie dokładnej realizacji harmonogramu predykcyjnego przy zachowaniu dobrej jakości uszeregowania. Powyższe reguły priorytetowe są opracowane dla problemu minimalizacji ważonego kosztu niestabilności [9]. Możliwe jest łączenie priorytetów – kolejność zadań jest ustalana wtedy na podstawie kilku reguł priorytetowych.

Wyniki eksperymentów obliczeniowych dla problemu minimalizacji kosztu niestabilności [9] wskazują na to, że spośród priorytetów najlepsze wyniki są osiągane przy zastosowaniu reguły *EBST*.

#### 4.2. Procedury próbkowania rozwiązań

Podstawowa procedura próbkowania w każdym punkcie decyzyjnym  $t$  sprawdza wszystkie możliwe listy priorytetowe i cztery schematy generowania harmonogramów

SGS. Wybierane jest uszeregowanie, dla którego koszt stabilności jest najmniejszy. Algorytm w danym momencie  $t$  wybiera najlepsze rozwiązanie stosując  $L$  różnych list priorytetowych  $\lambda_l \in (\lambda_1, \dots, \lambda_L)$  w połączeniu z różnymi schematami SGS (odpornym równoległym, odpornym szeregowym, równoległym, szeregowym). Badane są łącznie  $4 \cdot L$  uszeregowania zadań pod kątem minimalizacji odchyień między czasami rozpoczęcia zadań w uzyskanym harmonogramie a planowanymi terminami rozpoczęcia określonymi w harmonogramie predyktywnym.

#### 4.3. Harmonogramowanie z oknem czasowym

Harmonogramowanie z oknem czasowym jest stosowane przy procedurze próbkowania rozwiązań. Zamiast analizowania wszystkich czynności, które w momencie  $t$  nie zostały jeszcze rozpoczęte, rozpatrywane są jedynie zadania, które zgodnie z harmonogramem predyktywnym, mają rozpocząć się nieznacznie później niż w momencie  $t$ . Są to tzw. procedury próbkowania z oknem czasowym (ang. *Time-Window Sampling*). Nie jest generowany cały harmonogram. Tworzony jest tylko harmonogram częściowy, w którym za pomocą schematu SGS ustala się uszeregowanie czynności w oknie czasowym  $[t, t + \theta]$ . Rozmiar okna czasowego  $\theta$  to istotny parametr w tej procedurze, ustalany przez projektanta systemu. Harmonogramowanie z oknem czasowym jest strategią częściowego reharmonogramowania.

#### 4.4. Algorytmy lokalnych poszukiwań

Algorytmy lokalnych poszukiwań są stosowane dla problemu reaktywnego harmonogramowania z ważonym kosztem niestabilności.

Jednym z stosowanych rozwiązań jest sprowadzenie problemu do zagadnienia *RCPSP* z minimalizacją ważonych kosztów opóźnień i przyspieszeń wykonania poszczególnych zadań *RCPSP-WET* (ang. *Weighted Earliness Tardiness*)  $m, 1/cpm/early/tardy$  w notacji Herroelena [2]. Dla problemu *RCPSP-WET* znane są algorytmy dokładne, ale nie mogą one być stosowane w każdym momencie reharmonogramowania ze względu na duży koszt obliczeniowy [10]. Z tego powodu opracowana jest procedura przybliżona iteracyjnego lokalnego przeszukiwania *ILS* (ang. *Iterative Local Search*) [10]. Wyniki eksperymentów obliczeniowych wskazują na to, że procedura reaktywna *ILS* opracowana dla problemu *RCPSP-WET* daje lepsze rezultaty niż inne procedury reaktywne dla zagadnienia minimalizacji ważonego kosztu niestabilności harmonogramowania reaktywnego.

Innym stosowanym podejściem jest poprawa uszeregowania uzyskanych w wyniku reharmonogramowania na podstawie listy priorytetowej przy użyciu metaheurystyk. W badaniach dotyczących harmonogramowania reaktywnego dla problemu *RCPSP* opracowany jest algorytm z zabronionymi ruchami *Tabu Search* [11], który poprawia rozwiązanie bazowe poprzez zmiany w liście priorytetowej  $L$ . W danej iteracji każde dwie czynności sąsiadujące ze sobą na liście  $L$  i nie ograniczone zależnościami kolejnościowymi, są zamieniane i nowa lista priorytetowa  $L$  jest poddana ocenie. W trakcie iteracji minimalizowany jest ważony koszt niestabilności [2, 3, 4, 9, 10].

#### 4.5. Harmonogramowanie reaktywne przy czasowej niedostępności zasobów

Harmonogramowanie reaktywne przy zmiennej dostępności zasobów (przy awaryjności) stosowane jest w przypadku, gdy pojawiają się konflikty zasobów, którym nie



zapobiega harmonogram proaktywny. Konflikt zasobów najczęściej jest rozwiązywany przez odłożenie w czasie wykonania jednej lub większej liczby czynności, aż do przywrócenia wykonalności harmonogramu.

W zależności od środowiska produkcyjnego możliwe są następujące przypadki rozwiązywania problemu z czasową przerwą w wykorzystaniu zasobu [11]:

1. czynność zakłócona po przywróceniu zasobu do użytku (naprawie) musi być rozpoczęta od początku (ang. *preempt-repeat*),
2. czynność przerwana po przywróceniu zasobu do użytku może być kontynuowana (ang. *preempt-resume*),
3. czynność może być wykonywana przez inny zasób po przebrojeniu (ang. *preempt-setup*).

Każdy z przypadków występuje w środowiskach realizacji projektów i jest rozpatrywany w badaniach dotyczących reharmonogramowania.

Algorytmem reaktywnego harmonogramowania z czasową niedostępnością zasobów jest algorytm, w którym generowane jest uszeregowanie na podstawie listy priorytetowej [11]. Stosowany jest zmodyfikowany szeregowy *SGS* (ang. *modified serial SGS*), który uwzględnia aktualne informacje o dostępności zasobów (w trakcie realizacji harmonogramu). Modyfikacja procedury *SGS* sprowadza się do rozpatrzenia przypadku, w którym czynność jest rozpoczęta, ale nie może być dokończona ze względu na czasową niedostępność zasobu (awarię), który ją realizował. Rozważane są przypadki, w których czynność może być pozostawiona w stanie niezmienionym w oczekiwaniu na zasób potrzebny do jej realizacji lub może być przerwana i rozpoczęta od początku. W danym momencie  $t$ , w którym pojawia się zakłócenie (awaria maszyny, powodująca niewykonalność harmonogramu ze względu na niedostateczną dostępność zasobów) tworzona jest lista czynności  $L$  jeszcze nie zakończonych, w kolejności wynikającej ze stosowanej reguły priorytetowej (reguły jak w punkcie 4.1). Zadania wybierane kolejno z listy  $L$  są rozpoczynane w najwcześniejszym możliwym terminie rozpoczęcia przy spełnieniu aktualnych ograniczeń zasobowych i kolejnościowych, przy założeniu, że czynność nie może być rozpoczęta wcześniej niż jej czas rozpoczęcia w harmonogramie predyktywnym  $S^0$  – harmonogramowanie kolejowe.

## 5. Zakończenie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące harmonogramowania projektu w warunkach niepewności, koncentrując się na reaktywnym harmonogramowaniu. Przedstawiono wybrane algorytmy reharmonogramowania, których zastosowanie może zwiększyć stabilność produkcji. W ostatnich latach rośnie zainteresowanie tymi praktycznymi aspektami szeregowania zadań. Jest to tematyka bardzo aktualna.

## Literatura

1. Vieira G.E., Herrmann J.W., Lin E.: Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies and methods, *Journal of Scheduling*, 6, 1, 2003, s. 35-58.
2. Van De Vonder S.: Proactive-reactive procedures for robust project scheduling, Praca doktorska, Katolicki Uniwersytet Lowański, Belgia, 2006.
3. Van De Vonder S., Demeulemeester E., Herroelen W.: An investigation of efficient and effective predictive-reactive project scheduling procedures, *Journal of Scheduling*, 10(2), Special Issue on Project Scheduling under Uncertainty, 2007.

4. Van De Vonder S., Demeulemeester E., Herroelen W.: A classification of predictive-reactive project scheduling procedures. *Journal of Scheduling*, 10, 2007, s. 195-207.
5. Zhu G., Bard J.F., Yu G.: Disruption management for resource-constrained project scheduling. *Journal of Operational Research Society* 56, 2005, s. 365-381.
6. Herrmann J.W.: Rescheduling strategies, policies and methods – Using the rescheduling framework to improve production scheduling, [w:] *Handbook of Production Scheduling*, J.W. Herrmann (red.), Springer, 2006, s. 135-148.
7. Klimek M.: Systemy reharmonogramowania produkcji. [w:] *Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie*, Knosala R. (red.), Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, T.1. , 2007, s. 425-433.
8. Klimek M., Łebkowski P.: Predictive-reactive project scheduling. [w:] *Innovations technologies in economics and innovative management*, Duda J. (red.), Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej, 2007, s. 198-206.
9. Van De Vonder S., Ballestin F., Demeulemeester E., Herroelen W.: Heuristic procedures for reactive project scheduling, *Raport badawczy KBI\_0605*, K.U.Leuven, 2006.
10. Herroelen W., Leus R.: Robust and reactive project scheduling: a review and classification of procedures, *International Journal of Production Research*, 42(8), 2004, s. 1599-1620.
11. Lambrechts O., Demeulemeester E. L., Herroelen W.S.: Proactive and reactive strategies for resource-constrained project scheduling with uncertain resource availabilities, *Journal of scheduling*, 11(2), 2008, s. 121-136.

Mgr inż. Marcin KLIMEK  
 Instytut Informatyki  
 Państwowa Szkoła Wyższa  
 im. Jana Pawła II  
 21-500 Biała Podlaska, ul. Sidorska 95/97  
 e-mail: marcin\_kli@interia.pl

Dr hab. inż. Piotr ŁEBKOWSKI, prof. AGH  
 Katedra Badań Operacyjnych i Technologii Informatycznych  
 Wydział Zarządzania, Akademia Górniczo-Hutnicza  
 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30  
 e-mail: plebkows@zarz.agh.edu.pl