Marcin Klimek

HARMONOGRAMOWANIE PROJEKTÓW W DYNAMICZNYCH ŚRODOWISKACH PRODUKCYJNYCH

Słowa kluczowe: harmonogramowanie projektów, zakłócenia produkcyjne, predyktywno-reaktywne harmonogramowanie

Wstęp

Zarządzanie projektami (przedsięwzięciami) jest coraz częściej stosowane w planowaniu produkcji. Wiele przedsiębiorstw prowadzi działalność w ramach przedsięwzięć realizowanych dla dostarczenia klientowi określonego produktu. Ponad 25% działalności gospodarczej nadaje się do zarządzania przez projekty (Kostrubiec 2003 s.33). Przykładowe projekty to: realizacja dużych przedsięwzięć informatycznych czy realizacja prac budowlanych.

Powstaje wiele prac analizujących teoretyczne i praktyczne aspekty planowania zadań projektowych. Szczególnie duże praktyczne znaczenie mają algorytmy uwzględniające zmienność systemów produkcyjnych. Realizacja przedsięwzięcia odbywa się często w warunkach ryzyka i niepewności (mogą wystąpić np. zmiany zakresu projektu, błędy w zarządzaniu, zatory płatnicze, niekorzystne warunki atmosferyczne, trudności w koordynacji pracy itp.). W związku z dynamicznymi zmianami w środowisku produkcyjnym trudno dokładnie określić czasy trwania zadań. Podobnie – dostępność zasobów może ulegać zmianom np. z powodu ich awaryjności. Konieczne jest uwzględnienie niepewności przy tworzeniu harmonogramu. Stosowane jest harmonogramowanie predyktywne (ang. *predictive scheduling*) zwane też proaktywnym (ang. *proactive scheduling*), w którym tworzy są harmonogram odporny przez antycypację możliwych zakłóceń (Leus 2003). Często jednak predyktywne podejście jest niewystarczające, pojawiają się nieprzewidywalne zakłócenia, które powodują, że dane uszeregowanie jest już niewydajne lub niemożliwe do zrealizowania. Zachodzi wtedy konieczność harmonogramowania reaktywnego (ang. *reactive scheduling*), które polega na rewizji istniejącego harmonogramu w odpowiedzi na pojawiające się zaburzenia.

W ostatnich latach najczęściej podejmowanym w badaniach dotyczących predyktywno-reaktywnego szeregowania projektów jest problem harmono-

gramowania projektów z ograniczoną dostępnością zasobów (ang. *RCPSP – Resource-Constrained Project Scheduling Problem*).

Sposoby reprezentacji problemu harmonogramowania projektu

Projekt (ang. *project*), to unikalny zbiór współzależnych czynności (zadań, operacji), wraz z określonym momentem rozpoczęcia i (lub) zakończenia, realizowany dla osiągnięcia przyjętych celów w ramach określonych zasobów (pracowników, maszyn, materiałów). Czynność, to część projektu, stanowiąca odrębną całość, dla której trzeba wyznaczyć terminy rozpoczęcia i/lub zakończenia. Czynności do realizacji wymagają określonego czasu i zasobów. Pomiędzy zadaniami w projekcie występują ograniczenia kolejnościowe, które odwzorowują logiczną kolejność wykonywania zadań w ramach projektu. Dla jednoznacznego określenia relacji konieczne jest podanie poprzednika (czyli czynności, która poprzez relację warunkuje rozpoczęcie lub zakończenie innej czynności), następnika oraz rodzaju relacji. Najczęściej stosowane w badaniach są relacje typu koniec-początek bez zwłoki (ang. *finish-start, zero-lag precedence*), w których następnik może się rozpocząć bezzwłocznie po zakończeniu poprzednika.

Dla zrealizowania czynności niezbędne są zasoby, które równocześnie stanowią ograniczenie w realizacji projektu. Przyjmujemy, że projekt jest realizowany przy użyciu zasobów odnawialnych (ang. *renewable*) tzn. takich, których dostępność jest odnawiana w kolejnych okresach czasu – ilość zasobu jest stała niezależnie od obciążeń w poprzednich okresach. Zasoby odnawialne to np. pracownicy, maszyny.

Przy reprezentowaniu problemów harmonogramowania projektów często stosuje się zapis w formie sieci (grafów). Wykorzystywane są dwa typy sieci (Kostrubiec 2003):

- sieć typu „czynność na węźle" *AON* (ang. *AON – Activity-On-Node*) tzw. sieć czynności – reprezentacja problemu, w której czynności znajdują się na węźle;
- sieć typu „czynność na łuku" *AOA* (ang. *AOA – Activity-On-Arc*) tzw. sieć zdarzeń – reprezentacja problemu, w której czynności znajdują się na łukach, natomiast węzły oznaczają zdarzenia, odpowiadające momentom rozpoczęcia i zakończenia czynności.

Sieć *AON* jest odpowiedniejsza dla problemów szeregowania z kryterium optymalizacji czasu. Projekty w sieci czynności *AON* reprezentowane są jako acykliczny, spójny, prosty graf skierowany *G(V, E)*, w którym *V* oznacza zbiór węzłów odpowiadający czynnościom, a *E* to zbiór łuków, które opisują zależności kolejnościowe między czynnościami. Do projektu pomocniczo dodawane są: fikcyjna czynność utożsamiana z rozpoczęciem projektu (ang. *dummy start activity*) – wierzchołek początkowy grafu *G(V, E)* oraz fikcyjna

czynność oznaczająca zakończenie projektu (ang. *dummy end activity*) – wierzchołek końcowy grafu *G(V, E)*. Czas trwania i zapotrzebowanie na zasoby obu fikcyjnych czynności wynosi 0. Pozostałe czynności posiadają niezerowe czasy trwania i pewne zapotrzebowanie na zasoby. Rozwiązania problemu *RCPSP* prezentowane są w postaci wykresu Gantt'a.

Rozwiązaniem problemu szeregowania zadań jest wektor terminów rozpoczęcia lub zakończenia poszczególnych zadań. Jest to tzw. reprezentacja bezpośrednia problemu, która jednak nie znalazła szerokiego zastosowania w praktyce.

Dla problemu deterministycznego RCPSP najczęściej stosowane są:

- reprezentacja permutacyjna, w której rozwiązaniem jest ciąg kolejnych numerów operacji tzw. lista czynności (ang. *activity-list*),
- reprezentacja reguł priorytetu (ang. *priority rule based,*), w której rozwiązaniem jest lista priorytetowa tzn. wektor o długości równej liczbie czynności, w którym każdemu elementowi przypisana jest reguła priorytetu.

Dla potrzeb harmonogramowania odpornego poza reprezentacją listy czynności i listy priorytetowej stosuje się również reprezentację listy buforów (ang. *buffer list representation*). Lista buforów wskazuje o jaki bufor czasowy, najwcześniejszy możliwy czas rozpoczęcia danej czynności, jest przesunięty w czasie. Przy generowaniu harmonogramu procedura dekodująca wykorzystuje równocześnie informacje z listy buforów i z listy priorytetowej (lub listy czynności).

Lista czynności i lista priorytetowa określają ważność operacji, na podstawie której, przy zastosowaniu odpowiedniej procedury dekodującej, ustalany jest harmonogram, czyli określane są terminy rozpoczęcia poszczególnych czynności. Jest to przekształcenie rozwiązania do reprezentacji bezpośredniej. W deterministycznym RCPSP najczęściej wykorzystywane są dwa schematy generowania harmonogramu SGS (ang. *SGS – Schedule Generation Scheme)* na podstawie listy czynności lub listy priorytetowej (Leus 2003):

- szeregowy SGS (ang. *serial SGS*) – w każdej iteracji rozpoczynana jest pierwsza nieuszeregowana czynność z listy czynności lub z listy priorytetowej, w najwcześniejszym możliwym terminie rozpoczęcia przy spełnieniu ograniczeń kolejnościowych i zasobowych,
- równoległy SGS (ang. *parallel SGS*) – iteracyjnie, w kolejnych momentach czasu t (w punktach decyzyjnych), rozpoczynane są wszystkie nieuszeregowane czynności, które mogą być rozpoczęte w kolejności wynikającej z listy czynności lub z listy priorytetowej, przy spełnieniu ograniczeń kolejnościowych i zasobowych.

Wymienione procedury dekodujące są efektywne przy stosowaniu kryterium minimalizacji czasu realizacji projektu *makespan*. W harmonogramowaniu reaktywnym poza kryterium wydajnościowym kluczowe jest zacho-

wanie stabilności harmonogramu predyktywnego. Aby zminimalizować odchylenia rzeczywistych terminów rozpoczęcia od planowanych, muszą stosowane być zmodyfikowane procedury dekodujące.

Wykorzystywane są odporne schematy generowania harmonogramu (Leus 2003):

- odporny równoległy SGS (ang. *robust parallel SGS*) – działa jak *parallel SGS* z dodatkowym ograniczeniem, aby nie rozpoczynać czynności przed ich planowym terminem rozpoczęcia wynikającym z harmonogramu predyktywnego tzw. *railway scheduling,*
- odporny szeregowy SGS (ang. *robust serial SGS*) – działa jak *serial SGS* z dodatkowym ograniczeniem, aby rozpoczynać czynności w momencie jak najbardziej zbliżonym do planowego terminu rozpoczęcia wynikającego z harmonogramu predyktywnego (w odróżnieniu do *robust parallel SGS* możliwe jest rozpoczęcie operacji przed planowanym czasem rozpoczęcia).

Model matematyczny problemu stochastycznego RCPSP

Poniżej zaprezentowany zostanie model matematyczny problemu stochastycznego *RCPSP* wykorzystywany m.in. w pracach (Herroelen, Leus 2004), (Leus 2003), (Van de Vonder, Demeulemeester, Herroelen 2005).

Model stochastyczny RCPSP:

Funkcja celu (minimalizacja ważonego kosztu niestabilności):

$$\min \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \left| s_i^R - s_i^0 \right| \quad , \qquad (1)$$

przy następujących ograniczeniach:

- następnik może rozpocząć się po zakończeniu poprzednika (ograniczenia kolejnościowe):

$$s_i + d_i \leq s_j \qquad \forall (i,j) \in E \quad , \qquad (2)$$

- w każdym momencie czasu t wykorzystanie zasobów odnawialnych przez wykonywane czynności nie przekracza wielkości dostępnych (ograniczenia zasobowe):

$$\sum_{i:i \in S} r_{ik} \leq a_k \qquad \forall t, \forall k \quad , \qquad (3)$$

- termin zakończenia projektu δ_n, który nie może być przekroczony (ograniczenia czasowe):

$$s_n \leq \delta_n . \qquad (4)$$

Oznaczenia i założenia:

– s_i^0 – planowany moment rozpoczęcia operacji *i*; zmienne decyzyjne do ustalenia podczas tworzenia harmonogramu predyktywnego,

– s_i^R – rzeczywisty moment rozpoczęcia operacji *i*, w harmonogramowaniu predyktywnym we wzorze 1 za s_i^R należy wstawić $E(s_i^R)$ jako oczekiwany czas rzeczywistego startu operacji *i*,

– w_i – waga określająca koszt zakłócenia przypadający na jednostkę czasu (koszt marginalny) związany z nieterminowością rozpoczęcia czynności *i*, koszt ten może być związany z dodatkowymi kosztami organizacyjnymi, z kosztami magazynowania materiałów, z karami umownymi związanymi z nieterminowym wykonaniem danego etapu projektu itp.,

– d_i – czas wykonywania operacji *i* (ang. *duration*),

– r_{ik} – zapotrzebowanie czynności *i* na zasób typu *k*,

– *n* czynności ponumerowanych od 1 do *n*, w taki sposób, że poprzednik ma zawsze niższy numer od następnika (porządek topologiczny),

– dwie fikcyjne operacje 0 i *n+1*, reprezentujące odpowiednio początek i koniec projektu, $d_0 = d_{n+1} = 0$.

Model powyższy z funkcją celu określoną wzorem (1) stwarza możliwość analizy problemu *RCPSP* pod kątem stabilności i wydajności (dwukryterialna funkcja celu):

– gdy przyjmiemy $w_1,\ldots, w_{n-1} = 0$ oraz $w_n \neq 0$ – problem sprowadza się do minimalizacji czasu realizacji projektu (kryterium wydajnościowe),

– gdy przyjmiemy $w_1 = w_2 = \ldots = w_{n-1} = w_n \neq 0$ – problem sprowadza się do uodpornienia harmonogramu na możliwe zakłócenia (kryterium stabilności),

– możliwość zdefiniowania problemu z określonymi przez klientów etapami realizacji projektu tzw. „kamieniami milowymi": czynnościom, po których interesujący klientów etap projektu jest w pełni zrealizowany, są nadawane dużo większe wagi (koszty niestabilności) niż pozostałym czynnościom.

Model przedstawiony powyżej nie jest jedynym stosowanym w badaniach dotyczących harmonogramowania projektów w warunkach niepewności. W pracy (Al-Fawzan, Haouari 2005) zaproponowano dwukryterialną funkcję celu:

$$z_\lambda = \lambda \cdot z_M + (1-\lambda) \cdot z_R \qquad 0 \leq \lambda \leq 1. \quad (5)$$

Funkcja parametryczna opisana wzorem (5) pozwala na analizę zależności między odpornością i stabilnością harmonogramu na zakłócenia a optymalnością wyrażoną przez czas realizacji projektu. Parametr λ definiuje relatywne znaczenie poszczególnych kryteriów optymalizacyjnych. W funkcji celu z_λ za kryterium minimalizacji czasu trwania (minimalizację

makespan) odpowiada element $\lambda \cdot z_M$, natomiast za kryterium odporności odpowiada element $(1-\lambda) \cdot z_R$.

Strategie reharmonogramowania zadań

W systemach gdzie występuje niepewność i zmienność konieczne jest stosowanie reharmonogramowania (ang. *rescheduling*) polegającego na zmianie bieżącego harmonogramu produkcji w odpowiedzi na zdarzenia zakłócające ten harmonogram. Dzięki zmianie uszeregowania zadań można rozwiązać konflikty występujące w bieżącym harmonogramie np. problem związany z niedostępnością zasobów. Można również wykorzystać pojawiające się szanse uzyskania bardziej efektywnego harmonogramu w związku np. ze zwiększeniem się dostępności zasobu.

Stosowane są dwie strategie reharmonogramowania (Vieira, Herrmann, Lin 2003):

- dynamiczne harmonogramowanie (ang. *dynamic scheduling*),
- predyktywno-reaktywne harmonogramowanie (ang. *predictive-reactive scheduling*).

W dynamicznym harmonogramowaniu, zwanym rzadziej *online scheduling*, nie tworzy się harmonogramów. Przydzielanie zadań do odpowiednich zasobów (maszyn) odbywa się w chwili, w której zasób (maszyna) jest gotowy do przetwarzania nowego zadania. Wykorzystywane są wszystkie informacje dostępne w tym momencie. Najczęściej tworzy się kolejkę zadań do przetwarzania w oparciu o określone kryterium (ang. *dispatching rules*): zadaniom, czekającym na przetwarzanie, nadaje się priorytety i zadanie o najwyższym priorytecie w danej chwili jest przydzielane do zasobu. Przykładowe kryteria to np. najkrótszy czas przetwarzania (ang. *SPT – Shortest Processing Time*), najwcześniejszy termin zakończenia (ang. *EDD – Earliest Due Date*) itp. Dynamiczne szeregowanie to wieloetapowy proces decyzyjny, w którym w kolejnych momentach czasu rozpoczynane są czynności w oparciu o kryterium np. minimalizacji czasu trwania projektu na podstawie wiedzy w tym czasie posiadanej.

W predyktywno-reaktywnym harmonogramowaniu na początku tworzy się harmonogram (ang. *baseline schedule*), który w trakcie realizacji jest zmieniany w odpowiedzi na pojawiające się zdarzenia, które mogą zaburzyć wydajność systemu lub uniemożliwić realizację tego harmonogramu (faza reaktywnego harmonogramowania). W szeregowaniu predyktywno-reaktywnym można wyróżnić następujące fazy (Vieira, Herrmann, Lin 2003):

Faza I. Faza predyktywnego harmonogramowania, w której tworzony jest harmonogram na początku działania systemu:

- nominalny (ang. *nominal schedule*) – uwzględniający jedynie aktualne parametry systemu, bez uwzględniania zmienności i niepewności parametrów systemu,
- predyktywny, odporny na zakłócenia (ang. *robust schedule*) – uwzględniający zmienność parametrów systemu – tworzenie takiego harmonogramu ma przeciwdziałać niestabilności i nerwowości (ang. *nervousness*) harmonogramów nominalnych; odporny harmonogram tworzy się m.in. wstawiając bufory czasowe przed zadaniami; podczas tworzenia może zostać uwzględniona statystyczna wiedza dotycząca możliwych zakłóceń planu produkcji, wykryta dzięki analizie wcześniejszego przebiegu produkcji.

Faza II. Faza reaktywnego harmonogramowania, polegająca na naprawie harmonogramu, w trakcie działania systemu, w reakcji na pojawiające się zakłócenia.

Predyktywno-reaktywne harmonogramowanie projektów w porównaniu z dynamicznym szeregowaniem posiada wiele zalet z praktycznego punktu widzeniu. Tworzenie harmonogramu przed realizacją projektu:

- pozwala oszacować czas zakończenia projektu, możliwe jest etapowe rozliczanie się z odbiorcami projektu (określanie czasów realizacji poszczególnych elementów projektu), pozwala ustalić kiedy korekty w planie są konieczne ze względu na możliwość niedotrzymania umownych terminów realizacji projektu,
- usprawnia organizację produkcji, stabilizuje pracę, umożliwia koordynację wewnętrznych zasobów przedsiębiorstwa (przezbrojenia, wspieranie personelu), ich wzajemne transfery między projektami (w środowisku wieloprojektowym),
- pozwala określić czasowe zapotrzebowanie na materiały (kontakty z dostawcami, zamówienia *just-in-time*),
- brak jednoznacznie ustalonych terminów realizacji procesów utrudnia procedury pozyskiwania i kontraktowania wykonawców.

Wymienione zalety tworzenia harmonogramów podkreślają znaczenie stabilności systemu produkcyjnego, którą można osiągnąć przez realizację ściśle określonego planu zawartego w harmonogramie. W związku z tym jednym z celów reaktywnego harmonogramowania jest zachowanie stabilności uszeregowania zadań (ang. *schedule stability*), czyli możliwie najdokładniejsza realizacja harmonogramu predyktywnego. Im większa liczba zmian w harmonogramie tym większa nerwowość produkcji (ang. *nervousness*), co może prowadzić do dezorganizacji produkcji.

Zdarzenia zakłócające realizację harmonogramu

W trakcie realizacji harmonogramu mogą pojawiać się zakłócenia (ang. *rescheduling factors*), które przyczyniają się do bezzwłocznej potrzeby ponownego harmonogramowania.

W harmonogramowaniu projektów mogą być rozpatrywane następujące zakłócenia (Zhu, Bard, Yu 2005):

- zakłócenia dotyczące sieci czynności projektu
  - ° pojawienie się nowych czynności,
  - ° pojawienie się nowych ograniczeń kolejnościowych,
- zakłócenia dotyczące czynności
  - ° zmiany w czasie trwania czynności w trakcie realizacji harmonogramu (np. stochastyczne czasy trwania czynności),
  - ° opóźnienie rozpoczęcia czynności (związane np. z nieterminowym dostarczeniem materiałów przez poddostawców),
  - ° zmiany zapotrzebowania na zasoby poszczególnych czynności,
- zakłócenia dotyczące zasobów
  - ° czasowa niedostępność zasobu (np. awaria maszyny),
  - ° stałe zwiększenie (zmniejszenie) dostępności zasobu,
- zakłócenia dotyczące terminów realizacji
  - ° zmiana (np. przyśpieszenie) terminu realizacji projektu,
  - ° zmiana terminu realizacji kamieni milowych projektu.

W harmonogramowaniu projektów najczęściej podejmowany jest problem niepewności związanej z czasami trwania czynności np. w pracach (Herroelen, Leus 2004), (Leus 2003), (Van de Vonder, Demeulemeester, Herroelen, Leus 2005). Jest to uzasadniane tym, że wiele różnego typu zakłóceń może przyczyniać się do zmiany czasów trwania czynności (np. niekorzystne warunki atmosferyczne, niedostępność zasobów, problemy z dostawami materiałów itp.). Zamiast analizowania wszystkich możliwych zaburzeń planu produkcji podejmowane są próby antycypacji możliwych zmian w czasach realizacji zadań.

Zakończenie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące harmonogramowania projektów w dynamicznych systemach produkcyjnych. Zaprezentowano modele i strategie wykorzystywane w badaniach dotyczących tego problemu.

Mimo wielu prac pojawiających się w ostatnich latach dotyczących predyktywno-reaktywnego harmonogramowania projektów brak jest opracowań kompleksowo analizujących możliwe zakłócenia występujące w systemach produkcyjnych. Istnieje wiele zagadnień dotyczących predyktywno-

reaktywnego harmonogramowania projektów w warunkach niepewności jeszcze nie analizowanych. Jest to tematyka bardzo rozwojowa.

Streszczenie

Zarządzanie projektami jest coraz częściej stosowane w planowaniu produkcji. M.in. w takich dziedzinach jak: sektor badań i rozwoju, sektor prac publicznych, sektor budowlany, budowa systemów informatycznych itp.. Harmonogramowanie projektów, jako część zarządzania projektami, sprowadza się do ustalenia czasów rozpoczęcia (i zakończenia) czynności realizujących dany projekt oraz alokacji poszczególnych zasobów do tych czynności. Większość prac teoretycznych dotyczących harmonogramowania projektów nie uwzględnia dynamiki rzeczywistych środowisk produkcyjnych. Aby usprawnić realizację przedsięwzięć konieczne jest uodparnianie uszeregowań na możliwe zakłócenia (harmonogramowanie predyktywne) oraz reagowanie na nieprzewidywalne zaburzenia w trakcie realizacji harmonogramu predyktywnego (harmonogramowanie reaktywne).

PROJECT SCHEDULING IN A DYNAMIC MANUFACTURING ENVIRONMENT

Key words: project scheduling, production disruptions, predictive-reactive scheduling

Summary

Project management is receiving a growing amount in attention in production planning. It concerns it such domains as: research-and-development (R&D), public infrastructure, construction, software development etc. Project scheduling, as a part of project management, is aimed at deciding when in time to start (and finish) activities and how to allocate resource into the project activities. The vast majority of the works in project scheduling doesn't take into consideration dynamics of production environments. In order to improve project execution is indispensable to robust schedule on disruptions (predictive scheduling) and reaction on unforeseen disturbances when predictive schedule is executed (reactive scheduling).

Literatura

1. Al-Fawzan M., Haouari M. (2005), A bi-objective problem for robust resource-constrained project scheduling. International Journal of Production Economics 96. s. 175-187.
2. Herroelen W., Leus R. (2004), Robust and reactive project scheduling: a review and classification of procedures. International Journal of Production Research 42(8). s. 1599–1620.
3. Kostrubiec A. (2003), Harmonogramowanie projektów – przegląd modeli. Inżynieria Zarządzania Przedsięwzięciami, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk. s. 33-52.
4. Leus R. (2003), The generation of stable project plans. Praca doktorska, Katolicki Uniwersytet Lowański, Belgia.
5. Van de Vonder S., Demeulemeester E., Herroelen W. (2005), Heuristic procedures for generating stable project baseline schedules. Third Euro Conference for Young OR researchers and practitioners (ORP3), Valencia Spain. s. 11-19.
6. Van De Vonder S, Demeulemeester E., Herroelen W., Leus R. (2006), The trade-off between stability and makespan in resource-constrained project scheduling. International Journal of Production Research 44(2). s.215-236.
7. Vieira G.E., Herrmann J.W., Lin E. (2003), Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies and methods. Journal of Scheduling 6(1). s. 35-58.
8. Zhu G., Bard J.F., Yu G. (2005), Disruption management for resource-constrained project scheduling. Journal of Operational Research Society 56. s. 365-381.