

SZEREGOWANIE ZADAŃ PRODUKCYJNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM DWUCZYNNIKOWEJ NIEPEWNOŚCI PROCESU

Lukasz SOBASZEK, Arkadiusz GOLA, Antoni ŚWIC

Streszczenie: Proces szeregowania zadań pozwala uzyskać odpowiedzi na wiele pytań dotyczących procesu produkcyjnego. Niestety niejednokrotnie harmonogramy produkcyjne opracowywane są wyłącznie na podstawie danych normatywnych, z pominięciem rzeczywistych informacji dotyczących produkcji. W niniejszej pracy autorzy przeprowadzili badania symulacyjne mające na celu określenie wpływu zmienności czasów realizowanych operacji oraz potencjalnych awarii maszyn na jakość opracowywanych harmonogramów produkcyjnych. Na wstępie omówiono zagadnienie szeregowania zadań w rzeczywistych systemach produkcyjnych, po czym zaprezentowano ideę odpornego harmonogramowania produkcji. Kolejną część publikacji stanowi opis metodyki przeprowadzonych symulacji wraz z dyskusją uzyskanych wyników.

Słowa kluczowe: szeregowanie zadań produkcyjnych, harmonogramowanie odporne, zmienność czasów operacji, awaryjność maszyn.

1. Wstęp

Harmonogramowanie jest niewątpliwie skutecznym narzędziem znajdującym zastosowanie w procesach planowania oraz sterowania produkcją. Wykorzystanie odpowiedniej metody szeregowania zadań pozwala, na podstawie marszruty technologicznej, informacji o dostępnych stanowiskach produkcyjnych, a także wymaganych czasach realizacji poszczególnych operacji, uzyskać informacje o planowanym terminie zakończenia produkcji, obciążeniu poszczególnych maszyn technologicznych, czy czasochłonności poszczególnych zadań. Należy jednak pamiętać, iż każdy rzeczywisty proces produkcyjny związany jest z występowaniem wielu czynników, które negatywnie wpływają na jego przebieg, powodując niejednokrotnie jego nerwowość i dezorganizację. Istnieje zatem potrzeba badania wpływu potencjalnych zakłóceń, a także opracowywania metod szeregowania zadań, które umożliwią ich uwzględnianie i kompensację, a przez to osiągnięcie stabilnego przebiegu realizowanych procesów.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu dwuczynnikowej niepewności procesu produkcyjnego w postaci zmienności czasów realizowanych operacji oraz awarii maszyn technologicznych na jakość opracowywanych harmonogramów produkcyjnych.

2. Szeregowanie zadań w rzeczywistym systemie wytwórczym

Pod pojęciem harmonogramowania produkcji (szeregowania zadań produkcyjnych) rozumie się *„określenie kolejności wykonywanych zadań i operacji na określonych stanowiskach produkcyjnych, tak aby uzyskać najlepsze wykorzystanie zasobów produkcyjnych względem określonego kryterium celu”* [1].

Generalnie wyróżnia się dwie główne metody szeregowania zadań produkcyjnych [1]:

- harmonogramowanie w przód – gdy dany jest czas poszczególnych operacji oraz data rozpoczęcia produkcji, a na podstawie tych informacji wyznacza się termin zakończenia realizacji zlecenia,
- harmonogramowanie wstecz – gdy dany jest wymagany czas zakończenia realizacji zlecenia oraz czasy poszczególnych operacji, a wyznacza się najpóźniejszy termin rozpoczęcia pierwszej operacji.

Analizując przedstawioną definicję szeregowania zadań produkcyjnych oraz wymienione metody harmonogramowania można stwierdzić, iż wydają się one dość proste. Niemniej jednak szeregowanie zadań produkcyjnych w realnym systemie produkcyjnym jest zagadnieniem bardzo złożonym i związanym z występowaniem wielu problemów.

Literatura ściśle klasyfikuje te problemy dzieląc je na odpowiednie grupy, wśród których wyróżnia się [2]:

- problemy związane z rodzajem systemu produkcyjnego (system przepływowy, gniazdowy lub otwarty),
- problemy związane z występowaniem czynników losowości (deterministyczne lub stochastyczne),
- problemy dotyczące charakteru występujących zmienności (statyczne lub dynamiczne),
- problemy powiązane lub nie powiązane z praktyką (teoretyczne i praktyczne).

Analizując publikacje naukowe dotyczące szeregowania zadań produkcyjnych należy wysnuć wniosek, iż przedmiotem aktualnych i licznych badań są [3-5]:

- problemy związane z harmonogramowaniem w systemach klasy *job-shop*,
- stochastyczne problemy szeregowania zadań,
- zagadnienia związane z dynamizmem procesów produkcyjnych,
- problemy wynikające z praktycznego podejścia do zagadnienia harmonogramowania.

Problem klasy *job-shop* nazywany jest dość często ogólnym problemem harmonogramowania (*general job-shop*) i dotyczy szeregowania zadań w typowym gnieździe produkcyjnym. Przypadek ten zakłada pełne uporządkowanie zadań wynikające z ograniczeń technologicznych. Zagadnienie *job-shop* jest dość często poruszane w obszarze harmonogramowania produkcji, gdyż jest to odwzorowanie typowego gniazda produkcyjnego. Stąd też problem ten określa się mianem problemu gniazdowego. Problemy związane z szeregowaniem zadań w tym środowisku dotyczą przyjmowanych ograniczeń oraz charakterystyki rozpatrywanego systemu produkcyjnego. Główny problem polega jednak na określeniu dopuszczalnego rozwiązania, przy jednoczesnym spełnieniu zakładanego kryterium celu. Zazwyczaj dotyczy ono minimalizacji czasu wykonania wszystkich operacji rozpatrywanego procesu [4, 6].

Obecnie odbiega się także od przyjmowania deterministycznego charakteru produkcji. Praktyka wykazuje, iż procesy produkcyjne związane są z występowaniem pewnych zmiennych losowych [3, 7]. Stochastyczny charakter systemu produkcyjnego przejawia się w tym, że wielkości takie jak termin gotowości, czasy wykonania operacji, czy też inne parametry systemu są zmiennymi losowymi o odpowiednich parametrach. Rozwiązywanie problemów tego typu polega na odpowiednim poznaniu zmienności wielkości charakterystycznych dla danego systemu produkcyjnego, tak aby można było określić ich odpowiednie wartości [2].

Każdy rodzaj produkcji charakteryzuje się dynamiką. Dlatego też problemy dynamiczne dotyczą systemów wymagających reorganizacji. W dynamicznych systemach wytwórczych mogą pojawić się prace (bądź inne zdarzenia), które nie były znane w chwili tworzenia

harmonogramu, a także zdarzenia, które nie były przewidziane w fazie planowania produkcji [3]. Umieszczenie takich elementów w utworzonym uszeregowaniu jest niejednokrotnie problemem samym w sobie, dlatego też dąży się do opracowania metod, które pozwolą przewidzieć przyszłe zdarzenia [6, 8-10]. Działanie takie ma na celu zwiększenie stabilności opracowanego uszeregowania.

Analizując literaturę z zakresu szeregowania zadań produkcyjnych zauważa się, iż większość proponowanych metod ma często charakter czysto teoretyczny. Głównie rozpowszechnione problemy harmonogramowania, to tzw. problemy testowe – stanowiące podstawę odniesienia podczas oceny uzyskanych wyników badań. Cechą charakterystyczną problemów testowych jest bazowanie na zbiorze założeń upraszczających. Przyjmowane założenia mogą być zgodne lub niezgodne z rzeczywistością. Przykładowo założenie, które brzmi „każda praca musi być wykonana do końca” jest jak najbardziej zgodne w praktykę. Natomiast założenie, które mówi, iż „maszyny nigdy się nie psują i są dostępne w ciągu całego czasu realizacji produkcji” jest nieprawdziwe, gdyż w rzeczywistym procesie produkcyjnym można dojść do awarii maszyny, czy też wymagany jest jej przestój w celu jej przeglądu bądź konserwacji [2].

Opracowywanie rozwiązań pozwalających eliminować powyższe problemy szeregowania zadań jest niewątpliwie ważnym zagadnieniem badawczym. Obecnie powstaje wiele nurtów naukowych, które mają na celu analizę przedstawionych zagadnień. Jednym z nich jest odporne szeregowanie zadań (ang. *robust scheduling*), które swoim obszarem obejmuje wiele czynników negatywnie wpływających na proces harmonogramowania. Często w literaturze nurt ten określany jest jako szeregowanie zadań produkcyjnych w warunkach niepewności [3, 11].

3. Harmonogram odporny jako odpowiedź na niepewność procesów produkcyjnych

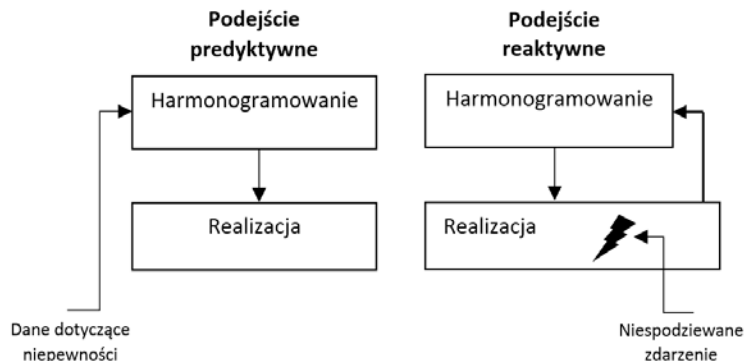
Odporne harmonogramowanie produkcji jest procesem, którego efektem jest utworzenie uszeregowania odpornego na zakłócenia – uwzględniającego zmienność parametrów systemu produkcyjnego. Celem budowy takiego harmonogramu jest przeciwdziałanie niestabilności i nerwowości [10-11].

Harmonogramowanie odporne jest ściśle związane z harmonogramowaniem predyktywno-reaktywnym. Jest ono połączeniem dwóch wspomnianych metod szeregowania zadań w warunkach niepewności (rys. 1) [9,11]:

1. Harmonogramowania predyktywnego, które związane jest z etapem planowania i w literaturze określane jest także mianem fazy *off-line*. To właśnie w trakcie tej fazy tworzone są:
 - harmonogram nominalny – uwzględniający aktualne parametry systemu,
 - harmonogram odporny (proaktywny) – uwzględniający niepewność i zmienność realizowanego procesu.
2. Harmonogramowania reaktywnego – związanego z etapem realizacji planu; w literaturze określane jako faza *on-line*. Uszeregowanie wówczas jest tworzone, bądź modyfikowane, w trakcie prowadzenia produkcji. Jakakolwiek zmiana procesu powoduje wdrożenie alternatywnego harmonogramu.

Harmonogramowanie odporne ma na celu minimalizację wpływu różnorodnych zakłóceń na realizowany proces. Opracowane uszeregowanie będzie mniej niepodatne na zakłócenia pojawiające się w trakcie procesu produkcyjnego.

Analizując typowe procesy produkcyjne należy stwierdzić, iż do źródeł niepewności zalicza się m.in.: czasy realizacji operacji, czasy przygotowawczo-zakończeniowe, czasy



Rys. 1. Harmonogramowanie predyktywne a reaktywne (na podstawie [9])

i dostępność transportu międzystanowiskowego, dostępność maszyn, dostępność pracowników i narzędzi, dostępność materiałów i półfabrykatów [12].

W niniejszej publikacji skupiono się na dwuczynnikowej niepewności procesu produkcyjnego rozpatrując:

- zmienność czasów realizowanych operacji,
- awarie maszyn technologicznych wykorzystywanych podczas produkcji.

W pracy uwzględniono właśnie te czynniki niepewności, ponieważ każdy z nich może powodować destabilizację, niedotrzymywanie terminów oraz nerwowość prowadzonego procesu produkcyjnego. W badaniach postanowiono sprawdzić jaki jest wpływ tych czynników na jakość uzyskanego harmonogramu produkcyjnego.

4. Badania symulacyjne

W celu zbadania wpływu czynników niepewności w postaci zmienności czasów realizowanych operacji, a także awarii wybranych maszyn technologicznych przeprowadzono badania symulacyjne z wykorzystaniem oprogramowania LiSA (ang. *Library of Scheduling Algorithms*) [13], realizując uprzednio wszystkie etapy procesu szeregowania zadań produkcyjnych. Celem badań symulacyjnych było utworzenie predyktywnego harmonogramu produkcyjnego uwzględniającego dwuczynnikową niepewność procesu.

4.1. Założenia dotyczące analizowanego procesu produkcyjnego

Przyjęto, iż produkcja polega na wykonaniu 8 elementów (zadań) o zdefiniowanych marszrutach technologicznych w parku maszynowym składającym się 11 stanowisk roboczych rozmieszczonych w sposób technologiczny. Każdy z elementów jest odrębnym produktem, przez co istnieje pełna dowolność co do czasów rozpoczęcia oraz zakończenia poszczególnych zadań. Elementy produkowane są w partiach po 100 sztuk. Produkcję należy zrealizować w jak najkrótszym czasie.

Dodatkowo zakłada się, iż mogą wystąpić zakłócenia procesu produkcyjnego w postaci odchyłek czasów operacji oraz awarii maszyn technologicznych.

4.2. Szeregowanie zadań produkcyjnych rozpatrywanego procesu

Każdy proces szeregowania zadań produkcyjnych należy rozpatrywać wieloetapowo. Jego przebieg określa się następująco [3,9]:

1. Określenie danych wejściowych.
2. Wybór kryterium celu.
3. Dobór metody harmonogramowania.
4. Symulacja przebiegu produkcji.

Podczas przeprowadzonych badań symulacyjnych przyjęto przedstawiony powyżej schemat postępowania. Dzięki temu możliwe było opracowanie porządkanych harmonogramów produkcyjnych.

4.2.1. Określenie danych wejściowych

Pierwszy etap procesu harmonogramowania zadań z wykorzystaniem rzeczywistych danych wymagał przeanalizowania 8 wybranych procesów technologicznych na podstawie których zdefiniowano zbiory danych wykorzystywane podczas szeregowania zadań za pomocą oprogramowania LiSA. Przykładowy proces technologiczny przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Proces technologiczny elementu nr 7 (zadanie 7) [44]

Nr operacji	Stanowisko	Nazwa operacji	t_{pz} [godz./partia]	t_j [godz./szt.]	$t = t_{pz} + t_j$ [dla 100 szt.]
10	RNA14	Toczenie	0,6	0,01	1,6
20	FNB26	Frezowanie	0,4	0,03	3,4
30	WS15	Wiercenie	0,25	0,04	4,25
40	ŚLUS.	Usuwanie zadziorów	0,15	0,01	1,15
50	SBB75	Szlifowanie	0,3	0,04	4,3
60	SWA10	Szlifowanie	0,15	0,01	1,15

Na podstawie danych technologicznych opracowano opis matematyczny, który następnie zaimplementowano w oprogramowaniu [3]. Wyznaczone zostały:

- zbiór dostępnych maszyn (stanowisk) M :

$$M = \{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}, M_{11}\}, \quad (1)$$

- zbiór realizowanych procesów technologicznych (zadań) J :

$$J = \{J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, J_7, J_8\}, \quad (2)$$

- macierz SIJ zawierająca informacje dotyczące wykorzystania maszyn (stanowisk) podczas realizacji procesów produkcyjnych (kolumny reprezentują kolejne stanowiska robocze, zaś wiersze – poszczególne zadania; wykonanie operacji danego zadania na danym stanowisku oznaczone jest 1):

$$SIJ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

- macierz *PIJ* zawierająca czasy operacji wykonywanych na poszczególnych stanowiskach (podobnie jak w przypadku macierzy *SIJ* wiersze reprezentują zadania, zaś kolumny stanowiska):

$$PIJ = \begin{bmatrix} 3.16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.30 & 0 & 0 \\ 1.60 & 0 & 0 & 10.20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.15 & 1.25 & 0 \\ 2.75 & 0 & 0 & 0 & 2.38 & 0 & 0 & 0 & 1.15 & 1.30 & 0 \\ 4.18 & 0 & 0 & 0 & 3.38 & 0 & 0 & 0 & 1.15 & 1.30 & 0 \\ 5.18 & 0 & 0 & 0 & 2.35 & 4.38 & 0 & 0 & 1.15 & 1.30 & 0 \\ 1.75 & 1.40 & 0 & 0 & 2.40 & 0 & 0 & 0 & 1.15 & 1.30 & 0 \\ 1.60 & 0 & 0 & 3.40 & 0 & 0 & 4.25 & 0 & 1.15 & 4.30 & 1.15 \\ 0 & 0 & 3.90 & 5.80 & 0 & 0 & 2.40 & 2.40 & 1.15 & 1.30 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

- macierz *MO* zawierająca kolejność wykonywania zadań na poszczególnych stanowiskach (podobnie jak w przypadku poprzednich macierzy – wiersze reprezentują zadania, zaś kolumny stanowiska):

$$MO = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 & 0 & 4 & 5 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 4 & 5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0 & 4 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 4 & 5 & 3 & 6 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Kolejnym etapem przygotowania danych wejściowych było opracowanie danych dotyczących niepewności analizowanego procesu. Podczas generowania tychże danych zastosowano następujące rozwiązania:

1. W przypadku **zmienności czasów realizowanych operacji** wykorzystano generator liczb portalu RANDOM.ORG, gdzie losowość oparta jest o szum atmosferyczny [15]. Korzystając z dostępnych narzędzi wygenerowano procentowe wartości zmienności czasów operacji dla 3 przypadków:
 - czasy operacji zmniejszone, bądź zwiększone o max. 15%,
 - czasy operacji zmniejszone o max. 15%,

- czasy operacji zwiększone o max. 15%.
- Przykładowe wielkości wygenerowane dla operacji zadania 5 wraz z czasami wynikowymi zostały zastawione w tabeli 2.

Tab. 2. Zmienność czasów operacji zadania 5.

Operacja	Czas norm.	Współczynnik zmiany – przypadek					
		± 15%		– 15%		+ 15%	
		Wartość %	Czas	Wartość %	Czas	Wartość %	Czas
Operacja 1	1,59	2%	1,61	9%	1,68	-2%	1,57
Operacja 2	3,59	14%	4,01	4%	3,71	-7%	3,38
Operacja 3	4,38	7%	4,66	0%	4,38	-14%	3,82
Operacja 4	2,38	-12%	2,14	1%	2,4	-5%	2,28
Operacja 5	1,15	-8%	1,07	3%	1,18	-6%	1,09
Operacja 6	1,30	-12%	1,18	13%	1,43	-6%	1,24

- W przypadku **awarii maszyn technologicznych** uwzględniono je jako bufor czasowy o odpowiedniej długości, które można jednocześnie traktować jako czas niezbędny na serwis maszyny. Wybrano 3 maszyny najbardziej obciążone pracą (M_1 , M_4 oraz M_{10}) i przyjęto dla nich następujące parametry awarii:

- dla maszyny M_1 przyjęto, iż awaria może wystąpić po 6 godzinach prowadzenia produkcji, a bufor czasowy będzie posiadał wielkość 2,5 godziny.,
- dla maszyny M_4 przyjęto, iż awaria może wystąpić po 10 godzinach prowadzenia produkcji, a bufor czasowy będzie posiadał wielkość 2 godzin,
- natomiast dla maszyny M_{10} przyjęto, iż awaria może wystąpić po 20 godz. prowadzenia produkcji, a bufor czasowy będzie posiadał wielkość 1,5 godziny.

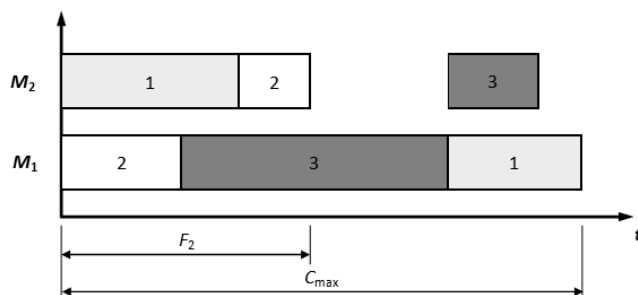
Awarie zostały uwzględnione w oprogramowaniu LiSA jako kolejne, jednooperacyjne zadania wykonywane na zagrożonych maszynach. Czasy wystąpienia awarii zostały zdefiniowane jako czasy gotowości poszczególnych operacji (odpowiednio 6, 10 i 20 godz.). Czasy te zostały dobrane tak, aby pojawiły się one w okresie, gdy na maszynach realizowana jest największa liczba operacji. Natomiast wielkość buforów została określona na podstawie analizy dostępnej dokumentacji serwisowej działu Utrzymania Ruchu wybranego przedsiębiorstwa produkcyjnego [16].

4.2.2. Wybór kryterium celu

Kluczowym elementem procesu harmonogramowania produkcji jest dobór odpowiedniego kryterium celu. Kryterium zazwyczaj powinno spełniać dwa podstawowe warunki: być zgodne z celem przedsiębiorstwa oraz umożliwiać dogodną analizę otrzymanych rezultatów [1]. Przyjęte kryterium celu jest niejednokrotnie kryterium oceny uzyskanego uszeregowania przez co stanowi doskonałe narzędzie porównywania rezultatów szeregowanie zadań z wykorzystaniem różnorodnych metod, również podczas oceny harmonogramów odpornych [3,11-12].

W prezentowanej pracy jako kryterium celu wybrano minimalizację wskaźnika C_{max} , a więc terminu realizacji wszystkich zleceń (określanego po angielsku jako *makespan*). Ponadto jako dodatkowe kryterium oceny wybrano wskaźnik F_i (ang. *flow time*) określający

czas przebywania w produkcji każdego z realizowanych zadań. Różnica pomiędzy zastosowanymi wskaźnikami została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Różnica pomiędzy wskaźnikiem C_{\max} a F_i (opracowanie własne na podstawie [2])

4.2.3. Dobór metody harmonogramowania

Odpowiednie usystematyzowanie danych wejściowych, a także określenie funkcji celu pozwala na przejście do kolejnego etapu szeregowania zadań jakim jest dobór metody harmonogramowania.

Metody szeregowania zadań dzieli się na dokładne oraz przybliżone. Metody dokładne mają za zadanie znalezienie uszeregowania, które będzie optymalne pod względem zakładanego kryterium celu. Niemniej jednak metody te, za względu na dużą złożoność obliczeniową oraz czas znalezienia rozwiązania, nie znajdują zastosowania w procesie rzeczywistego szeregowania zadań produkcyjnych. Natomiast dużą popularnością w tym obszarze badań cieszą się metody przybliżone, zwane także heurystycznymi. Wśród nich, jako najczęściej stosowane i najbardziej odpowiednie narzędzie szeregowania, wielu autorów wskazuje harmonogramowanie z zastosowaniem reguł priorytetów [3,4,11,17-19]. Jak główną zaletę tej metody szeregowania podają oni: szybki czas uzyskania rozwiązania, możliwość analizy alternatywnych scenariuszy szeregowania czy łatwość implementacji tejże metody.

Zatem w prezentowanej pracy jako metodę szeregowania zadań produkcyjnych zastosowano właśnie harmonogramowanie z wykorzystaniem reguł priorytetów.

Definicję reguły priorytetu można zapisać w następujący sposób [4]:

$$P_{IJ}(t) = \min\{z_{ij}(t)\}, (i, j) \in A(t) \quad (6)$$

gdzie: $P_{IJ}(t)$ – priorytet J -tej operacji I -tego zadania w chwili t , $z_{ij}(t)$ – wskaźnik priorytetu operacji j zadania i w chwili t , $A(t)$ – zbiór operacji oczekujących na wykonanie w chwili t .

Pod pojęciem „priorytetu” rozumie się właściwość jednej z oczekujących przed stanowiskiem (grupą stanowisk) operacji, która w wyniku działania odpowiedniej reguły została wybrana jako pierwsza do wykonania. „Wskaźnik priorytetu” jest numeryczną cechą każdej operacji oczekującej na wykonanie.

Podczas przeprowadzonych badań symulacyjnych wykorzystano następujące reguły priorytetów [19]:

- 1. Reguła priorytetu dla operacji, która pierwsza przybyła do kolejki (PPPO – Pierwsza Przybyła Pierwsza Obsłużona; ang. FCFS – First Come First Service).**

Zadaniem reguły PPPO (ang. FCFS) jest wybranie spośród operacji oczekujących w kolejce tej, która jako pierwsza przybyła do kolejki. W analizowanym przykładzie kolejność zadań będą definiować ich numery (1–8), zaś kolejność poszczególnych operacji – marszruta technologiczna.

- 2. Reguła priorytetu dla najwcześniejszego dyrektywnego terminu zakończenia zadania** (NTD – Najwcześniejszy Termin Dyrektywny; ang. EDD – *Earliest Due Date*). Rezultatem działania tej reguły jest wybranie operacji z najwcześniejszym dyrektywnym terminem zakończenia zadania (do którego dana operacja należy).
- 3. Reguła priorytetu dla najkrótszego czasu operacji** (NCO – Najkrótszy Czas Operacji; ang. SPT – *Shortest Processing Time*). Celem tej reguły jest wyselekcjonowanie spośród oczekujących na wykonanie operacji tej, która charakteryzuje się najkrótszym czasem wykonania.
- 4. Reguła priorytetu dla najdłuższego czasu operacji** (NDCO – Najdłuższy Czas Operacji; ang. LPT – *Longest Processing Time*). Reguła ta z kolejki oczekujących operacji wybiera tę, która charakteryzuje się najdłuższym czasem wykonania.
- 5. Reguła priorytetu dla operacji wybranej losowo** (LOS – Losowo; ang. RND – *Random*). Wartości wskaźników przydzielane są z różnych rozkładów zmiennych losowych. Reguła ta służy głównie jako punkt odniesienia w przypadku porównywania działania innych metod (reguł).

Wybór powyższych reguł jako metody szeregowania zadań w rozpatrywanym gnieździe wytwórczym pozwolił na rozpoczęcie prac nad badaniami symulacyjnymi.

4.2.4. Symulacja przebiegu produkcji

Realizacja 3 kolejnych etapów (określenie danych wejściowych, dobór kryterium celu oraz wybór metody szeregowania zadań) pozwoliła na przeprowadzenie ostatniego stadium procesu harmonogramowania jakim jest symulacja przebiegu produkcji z uwzględnieniem wybranych czynników niepewności.

Narzędziem, które umożliwiło szybką i dogodną realizację procesu harmonogramowania oraz ocenę uzyskanych rezultatów było oprogramowanie LiSA. Nazwa programu jest akronimem zwrotu *Library of Scheduling Algorithms*. Oprogramowanie to służy do rozwiązywania deterministycznych problemów szeregowania zadań. Program posiada bardzo prosty i intuicyjny interfejs. Aplikacja umożliwia także wygenerowanie danych w sposób losowy. Wszystkie informacje gromadzone są w plikach XML, co daje łatwy dostęp do danych wejściowych jak i rezultatów obliczeń. Praca w programie LiSA może być zapisana i kontynuowana w dowolnej chwili. Wykonanie komputerowo wspomaganego procesu szeregowania zadań wymaga określenia typowych parametrów wymaganych w procesie harmonogramowania: liczby zadań, liczby maszyn, kolejności wykonywanych zadań, czasów operacji, czasów rozpoczęcia i zakończenia prac, a także występujących ograniczeń. Analizie mogą być poddane zarówno przypadki jedno-maszynowe, z maszynami równoległymi, czy typowe środowiska produkcyjne [13]. Program nie posiada wygórowanych wymagań sprzętowych przez co symulację z łatwością można wykonać na każdym współczesnym komputerze klasy PC.

Korzystając z zaprezentowanego oprogramowania przeprowadzono szeregowanie zadań produkcyjnych dla 6 różnorodnych scenariuszy, a następnie przeanalizowano otrzymane rezultaty. Każdy z rozpatrywanych scenariuszy opierał się o inne założenia:

- 1. Scenariusz I:** Czasy operacji mają długość określaną w dokumentacji technologicznej.
- 2. Scenariusz II:** Czasy operacji zostały wydłużone bądź skrócone o max. 15%.

3. **Scenariusz III:** Czasy operacji zostały wydłużone o max. 15%.
4. **Scenariusz IV:** Czasy operacji zostały skrócone o max. 15%.
5. **Scenariusz V:** Na 3 najbardziej obciążonych maszynach mogą wystąpić awarie (umieszczono tam odpowiednie bufory serwisowe).
6. **Scenariusz VI:** Na 3 najbardziej obciążonych maszynach mogą wystąpić awarie, a czasy operacji zostały wydłużone bądź skrócone o max. 15% (połączenie scenariuszy II i V)

Dla każdego z analizowanych scenariuszy wyznaczono wskaźniki C_{\max} przy zastosowaniu różnych reguł priorytetu, a ponadto wskaźniki F_i dla harmonogramów utworzonych z wykorzystaniem reguły SPT, ponieważ była ona regułą, która pozwoliła na osiągnięcie najkrótszych czasów wykonania wszystkich zleceń w większości przypadków. Wyniki badań zestawiono w tabelach 3 i 4.

5. Rezultaty oraz dyskusja otrzymanych wyników

Analizując otrzymane wyniki badań należy stwierdzić, iż metoda szeregowania zadań z wykorzystaniem reguł priorytetów jest odpowiednią metodą harmonogramowania realnych procesów produkcyjnych. Uzyskane uszeregowania zostały wyznaczone w bardzo szybkim czasie, a otrzymane wyniki są czytelne i dogodne w analizie (rys. 3).

Otrzymane rezultaty badań symulacyjnych wskazują, iż dobór odpowiedniej reguły priorytetu podczas harmonogramowania jest kluczowym elementem tego procesu. W niektórych przypadkach rozbieżność pomiędzy harmonogramami uzyskanymi z wykorzystaniem odmiennych reguł wyniosła nawet 17 godz. co niewątpliwie jest znaczącą różnicą. Fakt ten pozwala wysnuć wniosek, iż rozpatrywanie różnorodnych reguł priorytetów jest istotnym i ważnym zagadnieniem, gdyż dobór nieodpowiedniej strategii szeregowania może mieć niekorzystne konsekwencje.

Tab. 3. Wartości wskaźnika F_i dla każdego z analizowanych scenariuszy

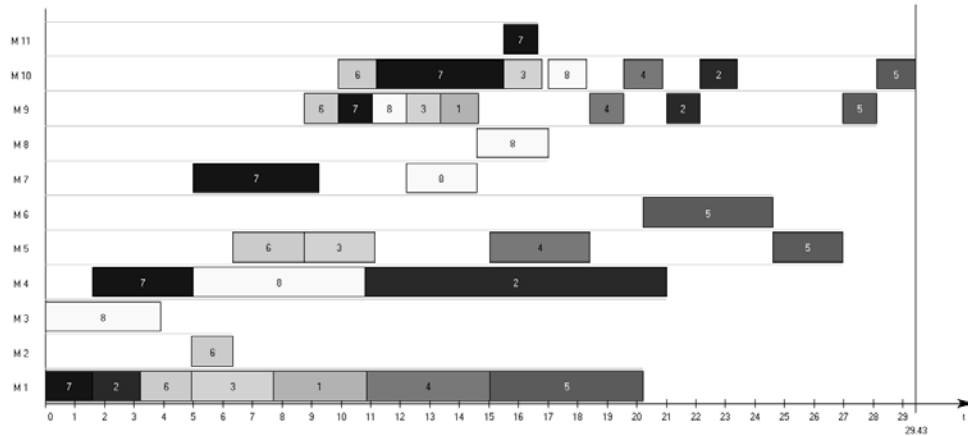
Nr zadania	Wartości funkcji F_i					
	Scen. I	Scen. II	Scen. III	Scen. IV	Scen. V	Scen. IV
Zadanie J1	7.7	6.64	8.48	6.72	10.15	9.9
Zadanie J2	21.8	21.61	23.81	20.04	28.8	29.15
Zadanie J3	11.85	9.61	12.06	9.91	14.3	12.42
Zadanie J4	10.01	9.84	10.46	9.4	11.94	13.38
Zadanie J5	14.39	14.67	14.78	13.38	14.39	14.64
Zadanie J6	8	12.83	15.3	12.82	8	19.26
Zadanie J7	16.65	14.47	16.88	14.43	16.65	14.47
Zadanie J8	18.3	17.73	19.96	17.08	25.05	24.99

Analizując uzyskane wartości rozpatrywanych wskaźników należy stwierdzić, iż dane wejściowe mają znaczący wpływ na rezultaty szeregowania. Wydłużenie lub skrócenie czasów operacji (scenariusz II i IV) skutkuje taką samą zmianą funkcji celu. Niemniej jednak już w przypadku losowego charakteru czasów operacji (scenariusz II) sytuacja nie jest tak oczywista. Częściowe skrócenie oraz częściowe wydłużenie czasów operacji pozwala uzyskać krótszy czas realizacji wszystkich zleceń. Pozwala to wysnuć wniosek, iż analiza rzeczywistych czasów wykonania operacji jest jak najbardziej zasadna. Wydłużenia czasów wszystkich operacji również nie należy postrzegać jako negatywnego wyniku, gdyż jest on tak naprawdę bliższy rzeczywistości i wskazuje na realny czas zakończenia produkcji. Informacja ta jest niezwykle ważna zwłaszcza w dzisiejszym, silnie konkurencyjnym świecie.

Tab. 4. Wartości wskaźnika C_{max} dla każdego z rozpatrywanych scenariuszy

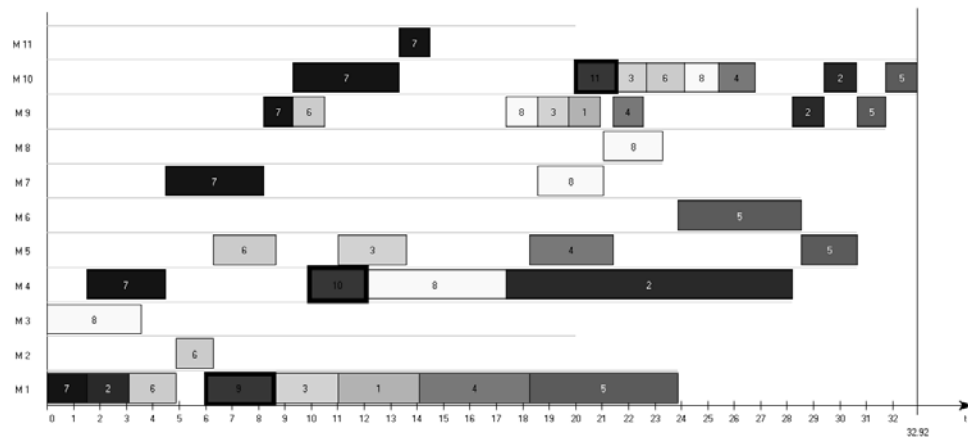
Rozpatrywany scenariusz	Reguła priorytetu	Wartość funkcji C_{max}
Scenariusz I: Normatywne czasy wykonania operacji	RND	29.48
	LPT	43.07
	SPT	29.43
	EDD	34.47
	FCFS	34.47
Scenariusz II: Zmiana czasów operacji (max. $\pm 15\%$)	RND	34.90
	LPT	42.58
	SPT	29.32
	EDD	33.25
	FCFS	33.25
Scenariusz III: Wydłużenie czasów operacji (max. $+15\%$)	RND	27.75
	LPT	45.41
	SPT	30.32
	EDD	36.57
	FCFS	36.57
Scenariusz IV: Skrócenie czasów operacji (max. -15%)	RND	24.92
	LPT	32.24
	SPT	27.45
	EDD	31.78
	FCFS	31.78
Scenariusz V: Awaria 3 maszyn	RND	40.7
	LPT	46.39
	SPT	32.98
	EDD	38.21
	FCFS	38.21
Scenariusz VI: Awaria 3 maszyn + zmiana czasów operacji (max. $\pm 15\%$)	RND	36.39
	LPT	45.45
	SPT	32.92
	EDD	37.06
	FCFS	37.06

Należy także zauważyć, że fakt wystąpienia awarii (scenariusz V) powoduje wydłużenie cyklu produkcyjnego – średnio 3,5 godziny. Wynik ten należy uznać za zadowalający, tym bardziej, iż całkowita długość rozpatrywanych buforów serwisowych wynosiła 6 godzin. Wydłużenie wskaźnika C_{max} zmniejsza się jednak, gdy pod uwagę bierze się także zmienność czasów operacji (scenariusz VI) (rys. 4). Wówczas różnica pomiędzy harmonogramem predyktywnym a harmonogramem nominalnym wynosi średnio 2,7 godziny. Rozstrzygnięcie czy taka zmiana wskaźników jest korzystna czy też nie jest dyskusyjne. Czas realizacji zleceń ewidentnie ulega wydłużeniu, lecz wartością dodaną



Rys. 3. Harmonogram nominalny uzyskany w wyniku użycia reguły SPT

może być pewniejsza, bardziej stabilna produkcja oraz brak konieczności zmiany harmonogramu w przypadku wystąpienia awarii.



Rys. 4. Harmonogram predykcyjny uwzględniający dwuczynnikową niepewność procesu (rezultat reguły SPT)

Analizując otrzymane wyniki należy także przyznać, iż w niektórych przypadkach znacząco wzrósł czas przebywania zadań w systemie produkcyjnym. Oczywiście zmiana ta powoduje jednocześnie zwiększenie stabilności harmonogramu, jednak warto zastanowić się nad próbą zmniejszenia wskaźników F_i , co pozwoliłoby w pewnym stopniu poprawić jakość uzyskanych uszeregowień.

6. Podsumowanie i nakreślenie dalszych prac

Harmonogramowanie produkcji jest niewątpliwie pomocnym narzędziem planowania i sterowania produkcją. Należy jednak dążyć, aby dostępne metody szeregowania zadań były rozwijane o możliwość analizy potencjalnych zaburzeń procesów produkcyjnych i ich

uwzględnianie w harmonogramie produkcyjnym. Takie podejście pozwoli na bardziej precyzyjne planowanie produkcji w rzeczywistych systemach wytwórczych.

Istnieje także potrzeba rozwijania metod umożliwiających analizę danych historycznych i wnioskowanie na jej podstawie o przyszłych wartościach czynników niepewności. Dane te będą stanowić wówczas doskonałe źródło wiedzy w procesie uodparniania harmonogramów produkcyjnych.

Uwzględnianie potencjalnych czynników niepewności można pogodzić z procesem szeregowania zadań produkcyjnych, co starano się przedstawić poprzez analizy przeprowadzone w niniejszej pracy.

Literatura

1. Al-Hinai N., ElMekkawy T. Y.: Robust And Stable Flexible Job Shop Scheduling with Random Machine Breakdowns using a Hybrid Genetic Algorithm. *International Journal of Production Economics*, Vol. 132, 2/2011, pp. 279-291.
2. Billaut J. Ch., Moukrim A., Sanlaville E.: *Flexibility and Robustness in Scheduling*, ISTE Ltd, London 2008.
3. Bräsel H., Dornheim L., Kutz S., Mörig M., Rössling I.: *LiSA – A Library of Scheduling Algorithms*. Magdeburg University, 2001.
4. Brzeziński M.: *Sterowanie produkcją – materiały do ćwiczeń i projektowania*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001.
5. Conway R. W.: *An Experimental Investigation of Priority Assignment in a Job Shop*. Santa Monica, California 1964.
6. Deepu P.: *Robust Schedules and Disruption Management for Job Shops*. Bozeman, Montana 2008.
7. Hong Gao: *Bulding Robust Schedules using Temporal Potection – An Emipirical Study of Constraint Based Scheduling Under Machine Failure Uncertainty*. Toronto, Ontario 1996.
8. Kalinowski K.: *Harmonogramowanie dyskretnych procesów produkcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
9. Klimek M.: *Predyktywno-reaktywne harmonogramowanie produkcji z ograniczoną dostępnością zasobów*, Kraków 2010.
10. Kłos S., Patalas-Maliszewska J., Trebuna P.: Improving Manufacturing Processes Using Simulation Methods. *Applied Computer Science*, Vol. 12, No, 4, 2016, pp. 7–17.
11. Knosala R.: *Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
12. Mujanah Ezat A.: *Slimulation of Production Scheduling in Manufacturing Systems*. Dublin City University, Dublin 1993.
13. Pająk E.: *Zarządzanie produkcją – produkt, technologia, organizacja*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
14. Pawlak M.: *Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
15. Portal RANDOM.ORG: <http://www.random.org> [data dostępu: 20-12-2016]
16. Sarker R, Omar M., Kamrul H., Essam D.: Hybrid Evolutionary Algorithm for Job Scheduling under Machine Maintenance. *Applied Soft Computing*, Vol. 13, 3/2013, pp. 1440-1447.
17. Sobaszek Ł., Gola A., Świć A.: *Analiza awaryjności parku maszynowego wybranego przedsiębiorstwa produkcyjnego z wykorzystaniem narzędzi predykcji*, [w:] *Innowacje*

- w zarządzaniu i inżynierii produkcji – t. 2, red. Knosala R., Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2016, s. 638-650.
18. Sobaszek Ł., Gola A.: Koncepcja zastosowania metody analizy przeżycia dla potrzeb predykcji zakłóceń procesu produkcyjnego. Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, t. 1, [red:] Knosala R., Opole: Towarzystwo Zarządzania Produkcją, 2015, s. 622-634.
19. Wróblewski K. J., Krawczyński R., Kosieradzka A., Kasprzyk S.: Reguły priorytetu w sterowaniu przepływem produkcji. WNT, Warszawa 1984.

Mgr inż. Łukasz SOBASZEK
Dr inż. Arkadiusz GOLA
Prof. dr hab. inż. Antoni ŚWIC
Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel.: (81) 538 42 84
e-mail: l.sobaszek@pollub.pl;
a.gola@pollub.pl
a.swic@pollub.pl