

# ALGORYTM PREDYKCJI AWARII ORAZ IMPLEMENTACJI REDUNDANTYCH ZABEZPIECZEŃ CZASOWYCH JAKO NARZĘDZIE ODPORNEGO SZEREGOWANIA ZADAŃ

Łukasz SOBASZEK, Arkadiusz GOLA, Antoni ŚWIC

**Streszczenie:** W pracy zaprezentowano autorskie algorytmy predykcji awarii maszyn oraz implementacji nadmiarowych zabezpieczeń czasowych, których zastosowanie ma na celu niwelowanie negatywnego wpływu analizowanych zakłóceń na realizację procesów produkcyjnych. W szczególności scharakteryzowano problem zabezpieczania harmonogramu produkcyjnego pod kątem potencjalnych awarii maszyny a także zaproponowano algorytm szacowania i implementacji buforów serwisowych. W części weryfikacyjnej przeprowadzono proces harmonogramowania z wykorzystaniem proponowanych algorytmów dla produkcji realizowanej w gniazdowym systemie wytwórczym (środowisku klasy *job shop*).

**Słowa kluczowe:** harmonogramowanie odporne, techniki redundantne, awaryjność maszyn technologicznych.

## 1. Wstęp

Szeregowanie zadań produkcyjnych jest tematem wielu prac naukowych [1–4]. Wśród proponowanych rozwiązań wyraźnie wyróżnić można nurt teoretyczny – gdy badacze bazują na szeregu założeń upraszczających, mając na celu głównie optymalizację opracowywanych harmonogramów [5] oraz nurt uwzględniający szeregowanie zadań produkcyjnych w realnych systemach wytwórczych – gdy autorzy starają się harmonogramować produkcję z uwzględnieniem szeregu czynników negatywnie wpływających na realizowane procesy [6,7]. Ponadto, w literaturze coraz częściej występuje zagadnienie predykcji potencjalnych zakłóceń w celu zwiększenia stabilności realizowanych procesów. Wśród wielu czynników negatywnie wpływających na przebieg procesów produkcyjnych często analizowane jest zagadnienie awarii maszyn parku technologicznego [7–9].

W niniejszej publikacji zaproponowano autorski algorytm predykcji awarii oraz algorytm szacowania i implementacji redundantnych zabezpieczeń czasowych. Ich zastosowanie ma na celu opracowanie odpornego harmonogramu produkcyjnego uwzględniającego zakłócenia procesów wytwórczych w postaci awarii maszyn technologicznych.

## 2. Szeregowanie zadań produkcyjnych w rzeczywistych systemach wytwórczych

Szeregowanie zadań produkcyjnych jest podstawowym elementem pracy każdego planisty. Harmonogramowanie produkcji, to zdefiniowanie kolejności wykonywanych zadań i operacji na stanowiskach produkcyjnych, przy jednoczesnym uwzględnieniu zakładanego kryterium celu. Idea harmonogramowania wydają się zatem dość prosta. Niemiej jednak

szeregowanie zadań produkcyjnych w realnych systemach wytwórczych jest zagadnieniem dużo bardziej złożonym. Jest to związane z występowaniem wielu zakłóceń, które w literaturze określane są mianem czynników niepewności [3,6,8]. Niepewności rozumiana jest wówczas jako nieznanostwo wartości parametrów czynników, które w negatywny sposób wpływają na realizację procesów produkcyjnych. Do czynników tych zalicza się głównie [11]:

- zmienność czasów przygotowawczo-zakończeniowych,
- zmienność czasów realizacji operacji technologicznych,
- niepewność związana z czasem i dostępnością transportu,
- niepewność związana z zatrudnieniem zewnętrznych wykonawców,
- napływanie nowych (niejednokrotnie priorytetowych) zleceń produkcyjnych,
- dostępność materiałów i półfabrykatów, pracowników i narzędzi,
- niepewność wynikająca z awaryjności maszyn technologicznych.

W literaturze coraz częściej proponowane są różnorodne rozwiązania mające na celu uwzględnianie powyższych czynników. Nurt ten określa się jako szeregowanie zadań w warunkach niepewności (ang. *scheduling under uncertainty*) [6,12], a także jako harmonogramowanie odporne (ang. *robust scheduling*) – wówczas dodatkowo proponowane są metody niwelowania negatywnego wpływu czynników zakłócających [2,4,7,8]. Odporne harmonogramowanie produkcji jest procesem, którego efektem jest utworzenie uszeregowania odpornego na zakłócenia – uwzględniającego zmienność parametrów systemu produkcyjnego [8]. Celem budowy takiego harmonogramu jest przeciwdziałanie niestabilności i nerwowości [2,7]. Niestety w literaturze często pomijany jest bardzo istotny fakt – skuteczne uodpornienie harmonogramu produkcyjnego powinno być poprzedzone wnikliwą analizą rozpatrywanych czynników niepewności. Tylko dokładne poznanie charakteru uwzględnianego zakłócenia, pozwoli na predykcję jego parametrów oraz skuteczne niwelowanie jego wpływu [8]. Dlatego też w niniejszej publikacji zaprezentowano algorytm predykcji czasu wystąpienia awarii oraz algorytm implementacji nadmiarowych zabezpieczeń czasowych chroniących uszeregowanie przed potencjalnymi awariami maszyn technologicznych realizujących procesy wytwórcze.

### 3. Algorytm predykcji awarii

#### 3.1. Źródło wiedzy o awariach maszyn technologicznych

W celu określenia charakteru procesu występowania awarii, niezbędne jest odpowiednie źródło danych historycznych. Takie informacje gromadzone są zazwyczaj przez Działy Utrzymania Ruchu. Odpowiednia ilość oraz jakość zgromadzonych informacji stanowi doskonałą bazę w procesie predykcji przyszłych awarii (rys. 1).

| MACHINE | Shift | Days |    |    |   |   |     |     |     |     |    |    |     |    |     |     |     |     |    |    |    |    |     |     |     |    |    |    |     |     |     |     |
|---------|-------|------|----|----|---|---|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
|         |       | 1    | 2  | 3  | 4 | 5 | 6   | 7   | 8   | 9   | 10 | 11 | 12  | 13 | 14  | 15  | 16  | 17  | 18 | 19 | 20 | 21 | 22  | 23  | 24  | 25 | 26 | 27 | 28  | 29  | 30  |     |
| 1       | I     | 480  | 5  |    |   |   |     |     |     | 480 |    |    |     |    | 15  | 480 | 20  |     |    |    |    |    |     | 480 | 60  |    |    |    |     | 100 | 40  | 480 |
|         | II    |      |    |    |   |   |     |     |     | 210 |    |    |     |    |     | 70  | 55  | 100 |    |    |    |    |     |     |     |    |    |    |     |     | 120 | 220 |
|         | III   | 140  | 10 |    |   |   |     |     |     |     |    |    |     |    |     | 25  | 480 |     |    |    |    |    |     | 20  |     |    |    |    |     |     | 65  | 15  |
| 2       | I     | 480  |    |    |   |   |     |     | 480 |     |    |    | 20  |    |     | 480 |     |     |    |    |    |    |     |     |     |    |    |    |     |     | 480 |     |
|         | II    | 150  | 65 |    |   |   |     |     |     |     |    | 10 |     |    |     |     |     |     |    |    |    |    |     |     |     |    |    |    |     |     | 480 |     |
|         | III   | 50   |    |    |   |   |     |     |     |     |    |    |     |    |     |     |     |     |    |    |    |    |     |     |     |    |    |    |     |     | 480 |     |
| 3       | I     | 480  |    |    |   |   |     | 480 | 75  |     | 15 |    |     |    | 480 |     |     |     |    |    |    |    |     | 480 |     |    |    |    |     | 50  | 480 |     |
|         | II    | 20   | 60 | 30 |   |   |     | 20  |     | 70  | 20 |    |     | 60 | 70  |     |     |     |    |    |    |    |     |     |     |    |    |    |     | 60  | 480 |     |
|         | III   |      |    | 10 |   |   |     |     |     | 90  | 10 |    |     |    |     |     |     |     |    |    |    |    |     |     |     |    |    |    |     | 120 | 45  |     |
| 4       | I     |      |    |    |   |   |     |     | 360 |     | 35 |    |     |    | 480 |     | 30  |     |    |    |    |    | 480 | 110 | 115 |    |    |    | 120 | 480 |     |     |
|         | II    |      |    |    |   |   |     | 15  |     | 70  | 15 |    | 100 |    | 60  |     |     |     |    |    |    |    | 20  | 60  |     |    |    |    |     |     | 480 |     |
|         | III   | 35   |    |    |   |   | 100 |     |     |     | 20 |    |     |    | 30  | 35  |     |     |    |    |    |    | 105 | 60  |     |    |    |    |     |     | 480 |     |

Rys. 1. Przykład danych serwisowych zapisanych z wykorzystaniem komputerowego arkusza danych

Wszystkie z przedstawionych powyżej metod łączy wspólna cecha – wykorzystanie każdej z nich pozwala gromadzić dane, które mogą zostać odpowiednio przetworzone i wykorzystane w procesie odpornego szeregowania zadań. Istotnymi parametrami są wówczas:

- czasy wystąpienia usterki  $t_i$  dla maszyny  $j$  – powiązane ze zmianą na której doszło do awarii, zgromadzone jako zbiór danych  $T_{Mj}$ :

$$T_{Mj} = \{t_1, t_2, \dots, t_b, \dots, t_n\} \quad (1)$$

gdzie:  $t_i$  – czas wystąpienia awarii [godz.],

- czasy napraw  $rt_i$ , informujące jednocześnie o długości trwania awarii, które zapisać można jako zbiór danych  $RT_{Mj}$ :

$$RT_{Mj} = \{rt_1, rt_2, \dots, rt_b, \dots, rt_n\} \quad (2)$$

gdzie:  $rt_i$  – długość usuwania usterki [min], przy czym:

$$rt_i \in (0; 480>.$$

Bazując na założeniu, iż awarie maszyn występują w odstępach będących wielokrotnością zmiany (8 godzin), przykładowy zbiór danych dla maszyny  $M_1$  przyjmie postać:

$$T_{M1} = \{8, 24, 16, 8, 32, 48, 16, 24, 8, \dots\} \text{ [godz.]}$$

Natomiast przykładowy zbiór danych historycznych dotyczący czasów napraw maszyny  $M_1$  można zapisać jako:

$$RT_{M1} = \{70, 30, 35, 190, 125, 30, 15, 10, 30, \dots\} \text{ [min]}$$

### 3.2. Estymacja prawdopodobieństwa i czasu wystąpienia awarii

Rezultatem predykcji przyszłych awarii maszyn jest określenie potencjalnych czasów wystąpienia awarii  $ft_{Mji}$  wraz z prawdopodobieństwami ich wystąpienia określanymi jako  $p_{Mji}$ . W celu estymacji tych wartości niezbędna jest realizacja kolejnych etapów proponowanego algorytmu.

**Etap 1** proponowanego algorytmu polega na zdefiniowaniu maszyny dla której prowadzony będzie proces predykcji, a także wczytaniu danych historycznych zawartych w zbiorze  $T_{Mj}$ .

W **etapie 2** realizowany jest odpowiedni zapis danych historycznych pochodzących z dokumentacji serwisowej. Dane dotyczące awarii wybranej maszyny technologicznej  $M_j$  zostają wówczas zapisane za pomocą odpowiedniej sekwencji:

$$\{(t_i, d_i)\}_{1 \leq i \leq n} \quad (3)$$

gdzie:  $t_i$  – czas awarii,  $d_i$  – liczba przypadków.

Kolejnym krokiem drugiego etapu proponowanego algorytmu jest wykonanie operacji sortowania – sekwencje zostają uporządkowane według rosnących wartości  $\{t_i\}_{1 \leq i \leq n}$ :

$$0 < t_1 < \dots < t_n \quad (4)$$

po czym zostają wyznaczone podstawowe statystyki dla zgromadzonych danych (wartość minimalna, maksymalna, średnia, rozstęp, kwartyly) oraz następuje ich wizualizacja. Dzięki tym operacjom możliwa jest filtracja zgromadzonych danych i usunięcie obserwacji odstających (wartości nietypowych).

**Etap 3** stanowi kluczowy element procesu wnioskowania, gdyż właśnie w tym etapie wyznaczana jest funkcja przeżycia charakteryzująca rozpatrywany proces awaryjności analizowanej maszyny. Wyznaczona funkcja jest doskonałym sposobem określania wzorców przeżywania. W etapie tym wykorzystana zostaje estymacja Kaplana-Meier'a – funkcja przeżycia określa jest jako:

$$\hat{S}(t) = \begin{cases} 1, & \text{dla } t < t_1 \\ \prod_{t_i \leq t} \frac{r_i - d_i}{r_i}, & \text{dla } t_1 < t \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:  $r_i$  – liczba wszystkich przypadków awarii określana jako:

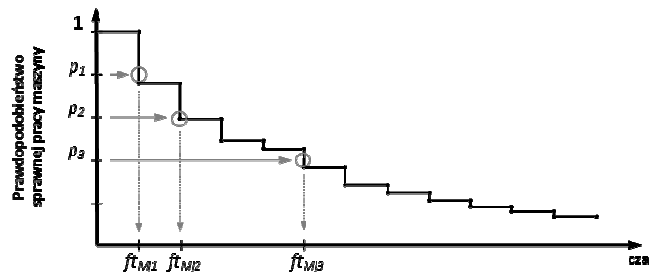
$$r_i = \sum_{j=i}^k d_j \quad (6)$$

Wówczas wyznaczona zostaje funkcja przeżycia, która na podstawie której określone są czasy wystąpienia potencjalnych awarii wraz z prawdopodobieństwem sprawnej pracy maszyny w tym czasie.

Wyznaczona funkcja wykorzystana zostaje w **etapie 4**, gdy bazując na uzyskanych wynikach można określić elementy zbiorów, które zostaną wykorzystane podczas procesu odpornego szeregowania zadań:

- zbioru potencjalnych czasów wystąpienia awarii rozpatrywanej maszyny  $FT_{Mj}$ ,
- zbioru prawdopodobieństwa wystąpienia awarii rozpatrywanej maszyny  $P_{Mj}$ .

Idea wyznaczania poszukiwanych elementów w czwartym etapie proponowanego algorytmu została przedstawiona na rysunku 2 – dla odpowiednich poziomów prawdopodobieństwa  $p_i$  wyznacza się prognozowane czas wystąpienia awarii  $\hat{t}_{Mji}$ .



Rys. 2. Określenie czasu wystąpienia awarii na podstawie przyjętej wartości prawdopodobieństwa przeżycia

Wyznaczenie funkcji przeżycia metodą estymacji Kaplana-Meier'a pozwala określić prawdopodobieństwo  $p_i$  sprawnej pracy maszyny w czasach  $\hat{t}_{Mji}$  określonych na podstawie danych historycznych. Prawdopodobieństwo awarii definiuje zatem zależność:

$$p_{Mji} = 1 - p_i \quad (7)$$

gdzie:  $p_{Mji}$  – prawdopodobieństwo wystąpienia awarii,  
 $p_i$  – prawdopodobieństwo sprawnej pracy maszyny.

Określenie interesujących dla planisty wartości prawdopodobieństwa  $p_{Mji}$  umożliwia wyznaczenie wartości  $f_{Mji}$  w których powinny zostać umieszczone redundantne zabezpieczenia czasowe.

Dodatkowo w ostatnim kroku etapu 4 dane gromadzone są w poszukiwanych zbiorach  $P_{Mj}$  oraz  $FT_{Mj}$ . Etap 4 ma charakter iteracyjny, a zatem jest powtarzany w zależności decyzji planisty co do ilości rozpatrywanych przedziałów prawdopodobieństwa. Realizację algorytmu należy powtórzyć dla kolejnych maszyn, dla których analizowana będzie ich awaryjność.

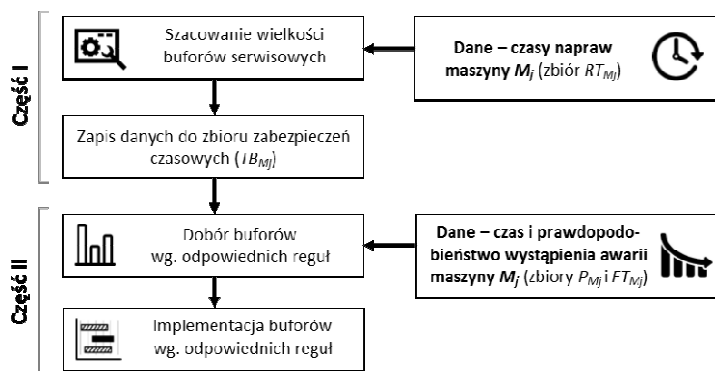
#### 4. Algorytm implementacji redundantnych zabezpieczeń czasowych

##### 4.1. Ogólna budowa algorytmu

Kolejnym kluczowym elementem proponowanej metody jest algorytm implementacji nadmiarowych buforów serwisowych, które będą stanowiły zabezpieczenia harmonogramu w przypadku wystąpienia awarii maszyny. Oprócz problemu implementacji buforów serwisowych niezwykle istotnym zagadnieniem jest szacowanie ich wielkości. Dlatego też niezbędne jest podzielenie proponowanego algorytmu na dwie główne części:

- **Część I** – odpowiedzialną za szacowanie wielkości buforów serwisowych,
- **Część II** – odpowiedzialną za implementację oszacowanych buforów w celu uzyskania odpornego harmonogramu predyktywnego.

Elementami składowymi głównych części algorytmów są odpowiednie etapy. Ogólny schemat algorytmu został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Ogólny schemat algorytmu uodpornienia harmonogramu pod kątem awarii

Źródłem wiedzy podczas szacowania wielkości są zgromadzone dane historyczne, których odpowiednia analiza pozwala na wyznaczanie wielkości potencjalnych awarii. Opracowane w ten sposób dane połączone wraz z rezultatami działania algorytmu predykcji awarii pozwolą na implementację zabezpieczeń czasowych według określonych reguł.

##### 4.2. Szacowanie wielkości buforów serwisowych

W celu uodpornienia uszeregowania konieczne jest uprzednie oszacowanie wielkości buforów serwisowych. Proces szacowania polega na uprzednim usystematyzowaniu danych historycznych zapisanych w zbiorze  $RT_{Mj}$  i odpowiednim ich wykorzystaniu.

**Etap 1** części odpowiedzialnej za szacowanie wielkości buforów serwisowych rozpoczyna się od wczytania danych historycznych oraz ich uszeregowania danych w sposób, zgodnie z zależnością:

$$0 < rt_1 < \dots < rt_n \quad (8)$$

Uszeregowane obserwacje zostają odpowiednio przefiltrowane (na podstawie uzyskanych wartości statystyk oraz wykresu pudełkowego), tak aby odrzucić nietypowe wartości obserwacji.

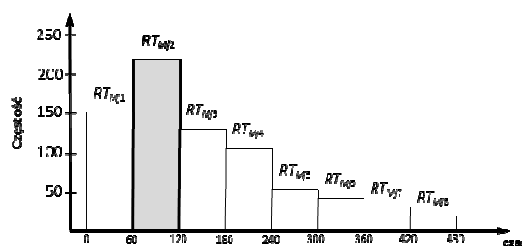
Następnie zgromadzone dane zostają podzielone na odpowiednie podzbiory – wówczas:

$$RT_{Mj} = \{RT_{Mj1}, RT_{Mj2}, \dots, RT_{Mji}, \dots, RT_{Mj8}\} \quad (9)$$

gdzie:  $RT_{Mji}$  – podzbiór zawierający informacje o długości napraw, przy czym:

$$\begin{aligned} RT_{Mj1} &= \{rt_i \in (0; 60>\} \\ RT_{Mj2} &= \{rt_i \in (60; 120>\} \\ &\dots \\ RT_{Mj8} &= \{rt_i \in (420; 480>\} \end{aligned}$$

Podział zgromadzonych danych na podzbiory zostaje wykorzystane w etapie 2 algorytmu, w którym określone są najczęściej występujące czasy awarii – dla każdego podzbiory określana jest jego liczebność, co umożliwi z kolei wizualizację i przystępną analizę wyników za pomocą histogramu (rys. 4).



Rys. 4. Reprezentacja zbiorów w postaci histogramu

**Etap 2** polega na wyznaczeniu zbiorów pomocniczych – w celu określenia czasów buforów serwisowych należy zidentyfikować podzbiór zbioru  $RT_{Mj}$  o największej mocy (liczebności). W tym celu wyznaczone zostają zbiory pomocnicze  $RT'_{Mj}$  oraz  $TB'_{Mj}$ :

$$RT'_{Mj} = \left\{ \overline{\overline{RT_{Mj1}}}, \overline{\overline{RT_{Mj2}}}, \dots, \overline{\overline{RT_{Mji}}}, \dots, \overline{\overline{RT_{Mj8}}} \right\}, \quad (10)$$

Zakładając, iż:

$$\bigvee_{\max(RT'_{Mj})} TB'_{Mj} = RT_{Mji} \quad (11)$$

wówczas:

$$TB'_{Mj} = \{rt_i \in \langle \min(RT_{Mji}); \max(RT_{Mji}) \rangle\} \quad (12)$$

gdzie:  $RT_{Mji}$  – podzbiór o największej mocy.

W ten sposób zostaje określony przedział czasu dla buforów serwisowych.

**Etap 3** algorytmu realizuje odpowiedni podział przewidywanego czasu niezbędnego na naprawy. Działanie to ma na celu oszacowanie wielkości buforów serwisowych, które następnie zostaną zaimplementowane do harmonogramu. Na tym etapie wyznaczony zostaje zbiór  $TB_{M_j}$ :

$$TB_{M_j} = \{tb_{M_j1}, tb_{M_j2}, \dots, tb_{M_ji}, \dots, tb_{M_jn}\} \quad (13)$$

zaś wartości poszczególnych elementów zbiorów określane są na podstawie zależności:

$$tb_{M_ji} = \frac{\max(TB'_{M_j})}{n_p} \cdot i \quad (14)$$

gdzie:  $i$  – numer elementu zbioru  $TB_{M_j}$ ,

$n_p$  – liczba rozpatrywanych poziomów prawdopodobieństwa (elementów zbioru  $P_{M_j}$ ).

W zależności od zdefiniowanych przez użytkownika ilości rozpatrywanych poziomów prawdopodobieństwa, etap 3 jest wykonywany iteracyjnie odpowiednią ilość razy. W ten sposób wyznaczone zostają elementy zbioru  $TB_{M_j}$ .

### 4.3. Reguły doboru oraz implementacji buforów serwisowych

Oszacowane wielkości buforów serwisowych znajdują zastosowanie w procesie uodpornienia harmonogramu. Polega on na wprowadzeniu modyfikacji opracowanego uszeregowania nominalnego poprzez dodanie redundantnych zabezpieczeń czasowych. Istotne jest zatem określenie reguł doboru oraz implementacji buforów, gdyż modyfikacje dotychczasowego uszeregowania mogą wpływać na jego parametry. Głównym parametrem ulegającym zmianie jest zazwyczaj funkcja celu.

Rezultatem działania zaprezentowanego rozdziale 3 algorytmu predykcji czasu wystąpienia awarii jest wyznaczenie par  $(p_{M_ji}, ft_{M_ji})$ . W ramach prezentowanego algorytmu implementacji wartości te zostają wykorzystane podczas:

1. Doboru wielkości buforów serwisowych wprowadzanych do harmonogramu.
2. Określenia miejsca w harmonogramie, w którym powinny zostać zaimplementowane bufory serwisowe.

Podobnie jak w przypadku poprzednio prezentowanych algorytmów dobór i implementacja buforów są procesem wieloetapowym. W **etapie 1** wykorzystywane są wyznaczone wartości prawdopodobieństwa zawarte w zbiorze  $P_{M_j}$ , które określają stopień ryzyka wystąpienia awarii danej maszyny technologicznej w czasie zdefiniowanym przez elementy zbioru  $FT_{M_j}$ . W celu implementacji buforów w odpowiednich miejscach harmonogramu opracowano reguły doboru wielkości buforów. W tym celu określono pojęcie kontrolnego stopnia prawdopodobieństwa  $p_{kM_jl}$ , który wyznacza się z zależności:

$$p_{kM_jl} = \frac{l}{n_p} \quad (15)$$

$$l = \langle 1, 2, \dots, n_p \rangle$$

gdzie:  $n_p$  – liczba rozpatrywanych poziomów prawdopodobieństwa (elementów zbioru  $P_{M_j}$ ).

Na podstawie elementów zbioru  $P_{M_j}$  oraz wprowadzonego współczynnika  $p_{kM_ji}$  zdefiniowano regułę doboru wielkości buforów zawartych w zbiorze  $TB_{M_j}$ , którą można

zapisać za pomocą następującego pseudokodu:

---

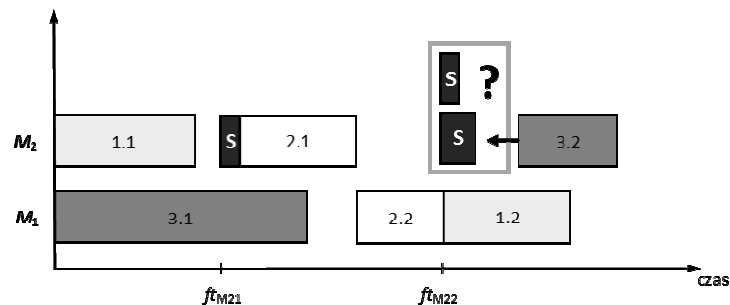
```

JEŻELI  $p_{Mji} \leq p_{kMj1}$ 
    dobierz bufor  $tb_{Mj1}$  (minimalny)
JEŻELI ZAŚ  $p_{Mji} > p_{kM1}$  i  $p_{Mji} \leq p_{kMj2}$ 
    dobierz bufor  $tb_{Mj2}$  (gdzie  $tb_{Mj2} > tb_{Mj1}$ )
    ...
JEŻELI ZAŚ  $p_{Mji} > p_{kMj(n-1)}$  i  $p_{mi} \leq p_{kMjn}$ 
    dobierz bufor  $tb_{Mjn}$  (gdzie  $tb_{Mjn} > tb_{Mj(n-1)}$ )
KONIEC WARUNKU

```

---

**Etapem 2** algorytmu jest implementacja buforów serwisowych. W tym celu zostały opracowane reguły, które uwzględnia sytuację, gdy w jednym miejscu konieczna będzie implementacja kilku buforów (rys. 5).



Rys. 5. Problem implementacji dwóch buforów w jednym miejscu

Ponieważ praktyka wskazuje, iż wraz z wydłużaniem się czasu pracy maszyny prawdopodobieństwo usterki wzrasta, w ramach proponowanej metody w miejscu w którym pojawia się problem umiejscowienia dwóch buforów zostanie zaimplementowany bufor o dłuższym czasie. Regułę tą można zapisać za pomocą następującego pseudokodu:

---

```

JEŻELI w czasie  $ft_{Mji}$  występuje bufor  $tb_{Mjk}$ 
    JEŻELI  $tb_{Mji} >$  od bieżącego bufora  $tb_{Mjk}$ 
        umieść bufor  $tb_{Mji}$ 
    W PRZECIWNYM WYPADKU
        zostaw bufor  $tb_{Mjk}$ 
    KONIEC WARUNKU
KONIEC WARUNKU

```

---

Tak opracowany algorytm pozwoli na dostosowanie harmonogramu produkcyjnego do realnie występujących czynników zakłócających w postaci awarii maszyn technologicznych.



## 5. Badania symulacyjne

W celu weryfikacji proponowanych algorytmów uodparniania harmonogramów produkcyjnych pod kątem potencjalnych awarii maszyn technologicznych przeprowadzono badania symulacyjne z wykorzystaniem oprogramowania LiSA (ang. *Library of Scheduling Algorithms*). Wykorzystując wspomniane oprogramowanie zrealizowano proces szeregowania zadań dla gniazdowego systemu produkcyjnego (środowiska klasy *job shop*).

Harmonogramowaniu poddano 8 zleceń produkcyjnych realizowanych za pomocą parku technologicznego składającego się z 5 maszyn. Czasy operacji technologicznych, kolejność wykonania operacji, a także obciążenie maszyn wygenerowano w sposób losowy (z pomocą oprogramowania LiSA) w oparciu o następujące założenia:

- czas operacji technologicznych nie mogą przekraczać jednej zmiany (czas operacji wynosi max. 7,5 godz.),
- obciążenie maszyn jest przyjęte na poziomie 75%,
- marszruta jest z góry narzucona i nie podlega zmianie.

W procesie szeregowania zadań produkcyjnych uwzględniono także awaryjność 3 maszyn technologicznych. Informacje dotyczące awaryjności maszyn, które pozwoliły na realizację proponowanych algorytmów były rzeczywistymi danymi pochodzącymi z przedsiębiorstwa produkcyjnego. Przyjęto, iż w uwzględnione zostaną 3 poziomy prawdopodobieństwa wystąpienia awarii:  $p_M = 0,25$ ,  $p_M = 0,5$  oraz  $p_M = 0,75$ . Realizacja poszczególnych etapów algorytmu predykcji pozwoliła na uzyskanie informacji dotyczących awaryjności maszyn technologicznych przedstawionych w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki zastosowania algorytmu predykcji awarii maszyn

| Poziom<br>prawdopodobieństwa | Przewidywane czasy wystąpienia awarii [godz.] |                 |                 |
|------------------------------|---|-----------------|-----------------|
|                              | Maszyna 1                                     | Maszyna 2       | Maszyna 3       |
| $p_M = 0,25$                 | $ft_{M11} = 8$                                | $ft_{M21} = 8$  | $ft_{M31} = 8$  |
| $p_M = 0,50$                 | $ft_{M12} = 16$                               | $ft_{M22} = 16$ | $ft_{M32} = 24$ |
| $p_M = 0,75$                 | $ft_{M13} = 40$                               | $ft_{M23} = 32$ | $ft_{M33} = 48$ |

Uzyskane informacje pozwoliły na zastosowanie algorytmu implementacji zabezpieczeń czasowych w wyniku czego wyznaczone zostały wielkości redundantnych buforów serwisowych oraz miejsca ich implementacji (tabela 2).

Tab. 2. Wielkości buforów serwisowych wyznaczone w wyniku działania algorytmu

| Miejsce<br>implementacji | Wielkości buforów [godz.] |                   |                   |
|--------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
|                          | Maszyna 1                 | Maszyna 2         | Maszyna 3         |
| po 8 godz.               | $tb_{M11} = 0,33$         | $tb_{M21} = 0,33$ | $tb_{M31} = 0,33$ |
| po 16 godz.              | $tb_{M12} = 0,67$         | $tb_{M22} = 0,67$ | $tb_{M31} = 0,33$ |
| po 24 godz.              | $tb_{M11} = 0,33$         | $tb_{M21} = 0,33$ | $tb_{M32} = 0,67$ |
| po 32 godz.              | $tb_{M12} = 0,67$         | $tb_{M23} = 1$    | $tb_{M31} = 0,33$ |
| po 40 godz.              | $tb_{M13} = 1$            | $tb_{M21} = 0,33$ | $tb_{M31} = 0,33$ |
| po 48 godz.              | $tb_{M12} = 0,33$         | $tb_{M22} = 0,67$ | $tb_{M33} = 1$    |

Otrzymane wyniki działania zastosowanych algorytmów pozwoliły na opracowanie odpornych harmonogramów produkcyjnych. W celu oceny skuteczności proponowanych rozwiązań jako mierniki oceny przyjęto:

- wskaźnik  $C_{\max}$  – termin zakończenia wszystkich prac (ang. *make-span, total production time*),

- wskaźnik  $y_J$  – liczba operacji krytycznych w odniesieniu do technologii (operacji jednego zadania),
- wskaźnik  $y_M$  – liczba operacji krytycznych w odniesieniu do ich realizacji na poszczególnych maszynach.

Podczas przeprowadzonych badań weryfikacyjnych jako metodę szeregowania zadań wykorzystano 4 popularne reguły priorytetów:

- regułę priorytetu dla operacji, która pierwsza przybyła do kolejki (ang. *FCFS – First Come First Service*).
- regułę priorytetu dla najwcześniejszego dyrektywnego terminu zakończenia zadania (ang. *EDD – Earliest Due Date*).
- regułę priorytetu dla najdłuższego czasu wykonania operacji (ang. *LPT – Longest Processing Time*).
- regułę priorytetu dla najkrótszego czasu wykonania operacji (ang. *SPT – Shortest Processing Time*).

Przy pomocy powyższych reguł zbudowano zarówno harmonogramy nominalne jak również harmonogramy odporne. Ponadto uzyskane harmonogramy odporne zoptymalizowano pod względem założonego kryterium celu przy wykorzystaniu wiedzy eksperckiej – modyfikacji wprowadzonej przez użytkownika.

Analizując rezultaty procesu uodparniania harmonogramu produkcyjnego należy stwierdzić, iż wprowadzenie buforów serwisowych powoduje wydłużenie terminu zakończenia wszystkich zleceń (tabela 3). Średnio jest to czas 14,77 godz., a więc ok. 2 zmian. Wydłużenie czasu realizacji powoduje jednak zwiększenie stabilności produkcji oraz wskazuje na rzeczywisty czas ukończenia produkcji, przy jednoczesnym uwzględnieniu awaryjności maszyn technologicznych. Z punktu widzenia produkcji taka informacja jest bardzo cenna, gdyż niejednokrotnie klientom (oprócz szybkiej realizacji) zależy także na wskazaniu realnego czasu zakończenia zlecenia.

Tab. 3. Wartości wskaźnika  $C_{\max}$  otrzymanych harmonogramów

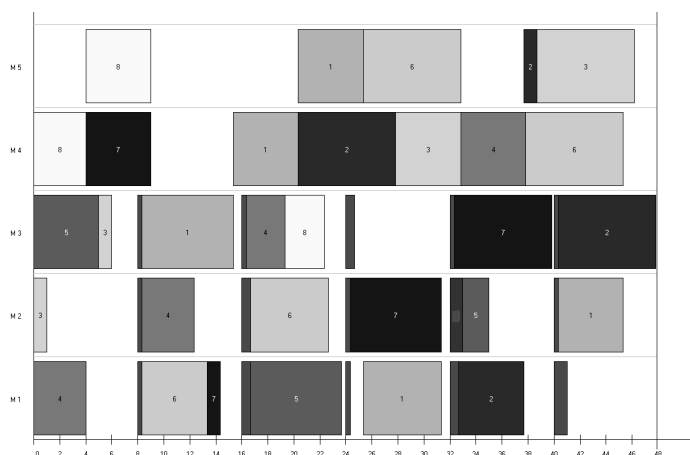
| Reguła priorytetu | Termin zakończenia wszystkich prac – $C_{\max}$ [godz.] |                     |                             |
|-------------------|---|---------------------|-----------------------------|
|                   | Harmonogram nominalny                                   | Harmonogram odporny | Harmonogram zoptymalizowany |
| <i>LPT</i>        | 48  | 67                  | 47,83                       |
| <i>SPT</i>        | 46  | 56,50               | 47,83                       |
| <i>FCFS</i>       | 43,5  | 56,50               | 47,83                       |
| <i>EDD</i>        | 49  | 63,17               | 47,83                       |

Konsekwencją uodpornienia harmonogramu była także zdecydowana minimalizacja operacji krytycznych – zarówno w obszarze realizowanych zadań jak i realizacji operacji na poszczególnych maszynach (tabela 4). Zarówno w harmonogramie odpornym jak i zoptymalizowanym ich liczba była praktycznie o połowę mniejsza w porównaniu z harmonogramem nominalnym. Zmniejszenie liczby operacji krytycznych powoduje zwiększenie stabilności prowadzonej produkcji oraz zmniejszenie jej nerwowości, gdyż w przypadku awarii technologicznej jest czas na usunięcie usterki bez negatywnego wpływu na realizację kolejnych operacji.

Tab. 4. Wartości wskaźnika operacji krytycznych  $y_j$  (w odniesieniu do technologii)

| Reguła priorytetu | Wskaźnik operacji krytycznych $y_j$ [-] |                     |                             |
|-------------------|---|---------------------|-----------------------------|
|                   | Harmonogram nominalny                   | Harmonogram odporny | Harmonogram zoptymalizowany |
| <i>LTP</i>        | 7                                       | 3                   | 4                           |
| <i>SPT</i>        | 11                                      | 6                   | 5                           |
| <i>FCFS</i>       | 8                                       | 4                   | 4                           |
| <i>EDD</i>        | 9                                       | 4                   | 4                           |

Przeprowadzone badania weryfikacyjne pozwalają sformułować wniosek, iż zastosowanie proponowanych algorytmów pozwala na uwzględnienie w harmonogramie produkcyjnym awarii maszyn technologicznych przy jednoczesnym zachowaniu wartości wskaźnika  $C_{max}$  oraz poprawie wartości wskaźnika liczby operacji krytycznych. Przykładowy harmonogram opracowany przy pomocy proponowanych algorytmów został przedstawiony na rysunku 6.



Rys. 6. Zoptymalizowany harmonogram odporny uzyskany na podstawie reguły SPT

## 6. Podsumowanie i nakreślenie kierunków 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 uwzględnianie ich wpływu w harmonogramie produkcyjnym. Zastosowanie proponowanych w publikacji algorytmów jest dowodem na to, iż możliwe jest szeregowanie zadań produkcyjnych przy jednoczesnym uwzględnieniu zakłóceń związanych z realizacją produkcji.

Kolejnym etapem zaprezentowanych prac jest weryfikacja harmonogramu podczas realizacji produkcji. W tym celu planowane jest wykorzystanie dostępnego na rynku oprogramowania (Tecnomatix Plant Simulation, Enterprise Dynamics) w celu oceny wartości innych wskaźników stabilności harmonogramów odpornych.

## Literatura

1. Gao K. Z., Suganthan P. N., Chua T. J., Chong C. S., Cai T. X., Pan Q. K.: A Two-Stage Artificial Bee Colony Algorithm Scheduling Flexible Job-Shop Scheduling Problem with New Job Insertion, *Expert Systems with Applications*, Vol. 42, Issue 21, 2015, pp. 7652–7663.
2. Kalinowski K.: *Harmonogramowanie dyskretnych procesów produkcyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013.
3. Kempa W., Paprocka I., Kalinowski K., Grabowik C.: Estimation of reliability characteristics in a production scheduling model with failures and time-changing parameters described by Gamma and exponential distributions, *Advanced Materials Research*, Vol. 837, 2014, pp. 116–121.
4. Klimek M.: Priority Algorithms for the Problem of Financial Optimisation of a Multi Stage Project, *Applied Computer Science*, vol. 13, no. 4, pp. 20–34.
5. Birgin E. G., Ferreira J. E., Ronconi D. P.: List Scheduling and Beam Search Methods for the Flexible Job Shop Scheduling Problem with Sequencing Flexibility, *European Journal of Operational Research*, Vol. 247, Issue 2, 2015, pp. 421–440.
6. Gonzalez-Rodriguez I., Puente J., Varela R., Vela C. R.: A Study of Schedule Robustness for Job Shop with Uncertainty, *LNAI*, vol. 5290, pp. 31–41.
7. Hong G.: *Bulding Robust Schedules using Temporal Potection – An Empirical Study of Constraint Based Scheduling Under Machine Failure Uncertainty*, Toronto, Ontario, 1996.
8. Sobaszek Ł., Gola A., Edward K.: Application of survival function in robust scheduling of production jobs, *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, pp. 575–578.
9. Kosicka E., Kozłowski E., Mazurkiewicz D.: Intelligent systems of forecasting the failure of machinery park and supporting fulfilment of orders of spare parts, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 637, 2018, pp. 54–63.
10. Billaut J. Ch., Moukrim A., Sanlaville E.: *Flexibility and Robustness in Scheduling*, ISTE Ltd, London 2008.
11. Mujanah Ezat A.: *Slimulation of Production Scheduling in Manufacturing Systems*. Dublin City University, Dublin 1993.
12. Sotskov Yu. N., Sotskova N. Yu., Lai T.-C., Werner F.: *Scheduling under Uncertainty – Theory and Algorithms*, Minsk, “Belorusskaya nauka”, 2010.

Mgr inż. Łukasz SOBASZEK  
Dr inż. Arkadiusz GOLA  
Prof. dr hab. inż. Antoni ŚWIĆ  
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