

KONCEPCJA ZASTOSOWANIA NARZĘDZI PREDYKCJI W PROJEKTOWANIU HARMONOGRAMÓW ODPORNICH

Słowa kluczowe:

szeregowanie zadań produkcyjnych, harmonogramowanie odporne, harmonogramowanie predyktywne

1. Wstęp

Współczesny rynek stawia przedsiębiorcom ogromne wymagania. Przebieg sprzedaży jest niestabilizowany, ceny towarów spadają, skróceniu ulegają cykle życia produktów. Dzieje się tak z powodu silnej walki konkurencyjnej, intensywnych działań marketingowych, a także dzięki zjawisku globalizacji rynków. Dziś produkcja nie polega już na wytwarzaniu zunifikowanych produktów w dużych seriach, lecz na spełnianiu wyszukanych wymagań klientów oraz produkcji bardzo zróżnicowanych wyrobów. Zorientowanie na klienta wymusza potrzebę ciągłego skracania czasu realizacji zleceń produkcyjnych [25].

Niezbędne zatem staje się efektywne planowanie produkcji oraz sterowanie jej przepływem. Proces ten jest składową wielu elementów. Jednym z kluczowych zadań sterowania produkcją jest szeregowanie zadań produkcyjnych. Odpowiednio opracowany harmonogram w pełni obrazuje przebieg produkcji oraz pozwala odpowiedzieć na najważniejsze pytania z nią związane [26].

Szeregowanie zadań produkcyjnych związane jest jednak z występowaniem wielu problemów. Ich rozwiązywanie jest przedmiotem szerokich badań. Autorzy licznych prac proponują coraz nowsze metody oraz techniki harmonogramowania produkcji [2, 25].

2. Problemy szeregowania zadań produkcyjnych

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* [19]. Dobór odpowiedniego kryterium podyktowany jest zazwyczaj charakterystyką procesu produkcyjnego oraz polityką przedsiębiorstwa.

Generalnie wyróżnia się dwie główne metody szeregowania zadań produkcyjnych [19]:

- harmonogramowanie w przód – dany jest wówczas czas poszczególnych operacji oraz data rozpoczęcia produkcji, a na podstawie tych informacji wyznacza się termin zakończenia realizacji zlecenia,

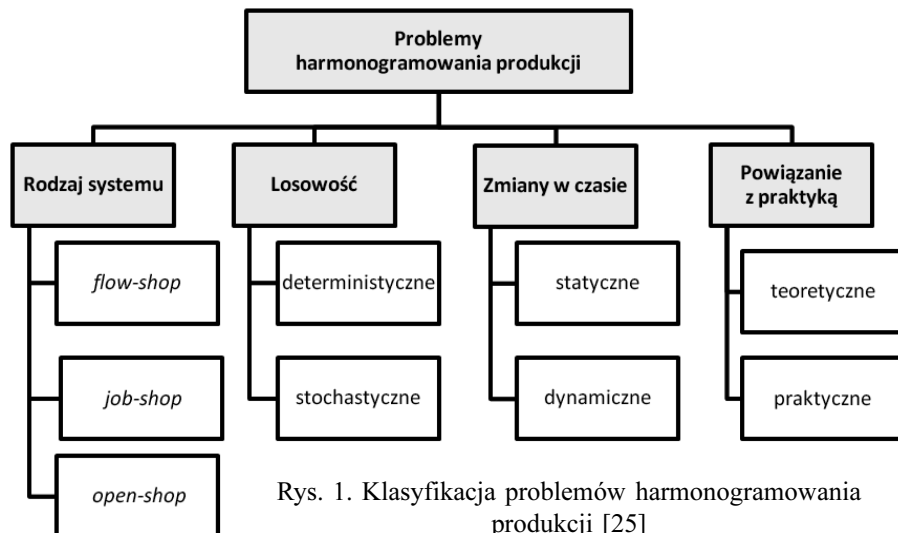
- harmonogramowanie wstecz, gdy dany jest wymagany czas zakończenia realizacji zlecenia oraz czasy poszczególnych operacji, a wyznacza się najpóźniejszy termin rozpoczęcia pierwszej operacji.

Mimo, iż przedstawione metody tworzenia harmonogramów wydają się dość proste, szeregowanie dużej liczby zadań produkcyjnych jest zagadnieniem bardzo złożonym. Dzieje się tak, ponieważ wpływ na rezultaty harmonogramowania produkcji ma wiele czynników. Stąd też pojawia się wiele problemów, które w literaturze są sklasyfikowane w sposób przedstawiony na rysunku 1 [25].

Analizując liczne publikacje naukowe dotyczące szeregowania zadań produkcyjnych należy wysnuć wniosek, iż przedmiotem aktualnych i licznych badań są [1, 12, 16, 21]:

- 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*). Przypadek ten zakłada pełne uporządkowanie zadań wynikające z ograniczeń technologicznych. Zagadnienie *job-shop* jest dość często poruszane w literaturze, 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



Rys. 1. Klasyfikacja problemów harmonogramowania produkcji [25]

wykonania wszystkich operacji rozpatrywanego procesu [5, 16].

Obecnie odbiega się także od przyjmowania deterministycznego charakteru produkcji. Praktyka wykazuje, iż procesy produkcyjne związane są z występowaniem pewnych zmiennych losowych [12]. 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 [20]. Każdy rodzaj produkcji charakteryzuje się dynamizmem. 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 [12]. Umieszczenie takich elementów w utworzonym uszeregowaniu jest niejednokrotnie problemem samym w sobie, dlatego też dąży się do opracowania metod, które pozwolą przewidzieć przyszłe zdarzenia [14, 22, 24]. 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 albo wymagany jest jej przestój, w celu jej przeglądu bądź konserwacji [20].

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 [12, 15].

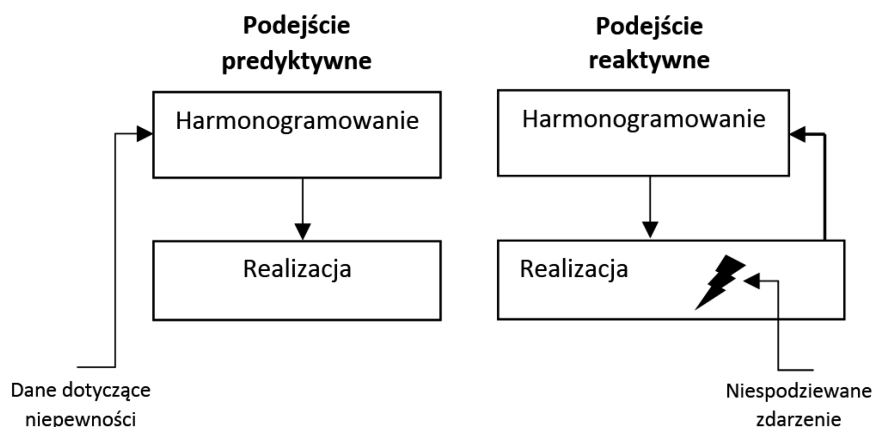
3. Odporne harmonogramowanie produkcji

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. Harmonogramowanie odporne jest ściśle związane z harmonogramowaniem predyktywno-reaktywnym. Jest ono połączeniem dwóch wspomnianych metod szeregowania zadań w warunkach niepewności (rys. 2) [8, 15]:

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 określanego 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 niepodatne na zakłócenia pojawiające się w trakcie procesu produkcyjnego. Do najczęściej stosowanych technik uodparniania harmonogramów zalicza się [5, 15]:

- techniki nadmiarowości (redundantne),
- harmonogramowanie warunkowe,
- budowanie częściowo uporządkowanych harmonogramów,
- analizę wrażliwości uszeregowania.



Rys. 2. Harmonogramowanie predyktywne a reaktywne (na podstawie [8])

4. Przegląd rozwiązań proponowanych w literaturze

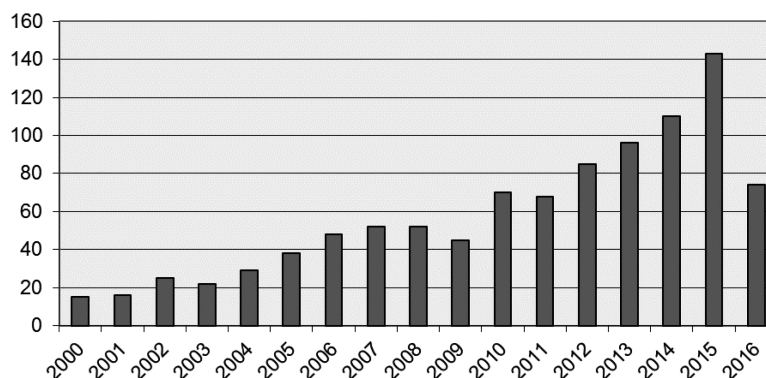
Zagadnienie odpornego szeregowania zadań jest tematem licznych prac naukowych. Analizując liczbę prac naukowych dotyczących zagadnienia *robust scheduling* na przełomie ostatnich lat, można zaobserwować zdecydowaną tendencję wzrostową (rys. 3).

Zagadnienie odpornego szeregowania zadań poruszane jest w wielu obszarach nauki. Podejście uwzględniające występowanie czynników niepewności analizowane jest w przemyśle chemicznym, informatyce i ogólnej teorii szeregowania czy harmonogramowaniu tras przejazdów. Poprzez rozwiązanie występujących problemów rozumie się zminimalizowanie ich negatywnego wpływu. Proponowane rozwiązania dotyczą głównie tworzenia nadmiarowych uszeregowania z wykorzystaniem buforów czasowych, a jako narzędzia wykorzystuje się algorytmy heurystyczne, meta-heurystyczne, szeregowanie rozmyte czy też harmonogramowanie stochastyczne [1, 7, 8].

Nie mniej jednak, zdecydowana większość publikacji naukowych dotyczy odpornego szeregowania zadań produkcyjnych w przemyśle maszynowym. Dzieje się tak, ponieważ harmonogramowanie produkcji w warunkach niepewności

obejmuje wiele grup problemów szeregowania zadań, a przez to jest przedmiotem szerokich badań i rozważań. Autorzy licznych prac proponują różnorodne rozwiązania, przy czym proponowane są one dla konkretnych typów systemów produkcyjnych. Zazwyczaj są to systemy klasy *flow-shop* (system przepływowy) oraz *job-shop* (system gniazdowy) [1, 3, 9, 21]. Wówczas autorzy starają się rozwiązywać problem szeregowania zadań w warunkach niepewności, stosując różnorodne metody – od klasycznych rozwiązań z wykorzystaniem algorytmów genetycznych po zaawansowane programowanie stochastyczne oraz wykorzystanie logiki rozmytej.

Jednakże, aby możliwa była implementacja omówionych rozwiązań, konieczne jest poznanie czynników generujących niepewność procesu, które najczęściej mają charakter losowy. Analiza literatury dotyczącej odpornego szeregowania zadań wskazuje, iż najczęściej rozpatrywanym czynnikiem zakłócającym jest dostępność zasobów. Coraz częściej zatem proponowane są różnorodne rozwiązania mające na celu identyfikację rozpatrywanych czynników niepewności w postaci awarii maszyn realizujących procesy produkcyjne. W tabeli 1 zostały zestawione rozwiązania tego problemu, jakie proponują autorzy publikacji naukowych.



Rys. 3. Liczba publikacji dotyczących zagadnienia *robust scheduling* (na podstawie bazy ScienceDirect)

Lp.	Proponowane rozwiązanie	Autorzy
1.	Wnioskowanie prawdopodobieństwa wystąpienia awarii na podstawie analizy typowych rozkładów prawdopodobieństwa, a następnie odpowiednie uodpornienie uszeregowania.	Davenport, Gefflot, Beck [4]; Gürel, Körpeolu, Aktürk [7]; Leon, Wu, Storer [17]
2.	Połączenie danych dotyczących losowości awarii, niezawodności maszyn oraz danych z PM (<i>Preventive Maintenance</i>); analizie poddawany jest wyłącznie przypadek jednomaszynowy.	Wei-Wei, Zhiqiang, Ershun [27]
3.	Wykorzystanie wskaźników MTTF, MTBR oraz MTTR w celu predykcji możliwych awarii i zbudowania odpowiedniego harmonogramu na podstawie uzyskanych danych.	Deepu [5], Hong Gao [8]
4.	Taktowanie awarii maszyn w sposób deterministyczny – ich obecność polega na dodaniu operacji pełniących funkcję awarii i testowaniu uzyskanego uszeregowania.	Jensen [10]
5.	Próba uodpornienia harmonogramów produkcyjnych z wykorzystaniem danych historycznych; zwrócenie uwagi na ważną rolę danych historycznych w procesie odpornego szeregowania zadań produkcyjnych.	Fox, Smith [6] Kalinowski, Krenczyk, Grabowik [11]
6.	Wykorzystanie wskaźnika MTTF (<i>Mean Time To First Failure</i>) w celu analiz awaryjności oraz zastosowanie wybranych metod analiz statystycznych w celu przybliżenia charakterystyk niezawodnościowych.	Kempa, Wosik, Skołud [14]; Skołud, Wosik, Kempa, Kalinowski [22]

Tab. 1. Główne nurty analizy czynników niepewności prezentowane w literaturze

Autorzy licznych publikacji starają się przedstawiać zastosowanie opracowanych rozwiązań w rzeczywistych systemach produkcyjnych i analizować ich efektywność. Niemiej jednak znaczna część publikacji (mimo, iż podejście odporne szeregowania ma na celu niwelowanie teoretycznych założeń upraszczających) traktuje zagadnienia odporne szeregowania zadań produkcyjnych nazbyt teoretycznie. Analizowane są przypadki o zdefiniowanej liczbie maszyn i zadań, a wyniki działania wykorzystanych algorytmów i technik porównywane są z rozwiązaniami innych autorów. Analiza czynników niepewności również bardzo często przyjmuje charakter rozpatrywania różnorodnych scenariuszy opartych o teoretycznie opracowane dane. Parametry dotyczące niezawodności zakładane są z góry i mają na celu weryfikację skuteczności proponowanych algorytmów szeregowania reaktywnego. Takie podejście powoduje, że faza predykcyjnego szeregowania produkcji zostaje niedoceniona, a to ona jest bazą dobrze opracowanego harmonogramu odpornego.

Zagadnienie odporne szeregowania produkcji powinno być analizowane głównie pod kątem rzeczywistych systemów produkcyjnych. Dlatego też należy prowadzić prace w celu badania potencjalnych, rzeczywistych zakłóceń procesu.

Istnieje zatem potrzeba opracowania metody projektowania harmonogramów odpornych z wykorzystaniem narzędzi predykcji, której podstawą będą rzeczywiste dane dotyczące awaryjności parku maszynowego. Opracowanie takiego rozwiązania pozwoli na wnikliwą analizę czynników niepewności oraz wykorzystanie tych danych w etapie predykcyjnego szeregowania zadań produkcyjnych.

5. Koncepcja zastosowania narzędzi predykcji w procesie odpornego szeregowania zadań produkcyjnych

Dokonany przegląd literatury pozwala wysnuć wniosek, iż istnieje potrzeba opracowania metody predykcyjnego harmonogramowania produkcji umożliwiającej estymację przebiegu prawdopodobieństwa wystąpienia awarii dostępnych maszyn z wykorzystaniem rzeczywistych danych dotyczących rozpatrywanego systemu produkcyjnego. Znajomość charakteru losowości potencjalnych zakłóceń pozwoli na identyfikację newralgicznych miejsc harmonogramu produkcyjnego, jego uodpornienie, a także zwiększenie stabilności realizowanych procesów. Proponowana koncepcja dotyczy szeregowania zadań w systemie gniazdowym, gdyż jest on najczęściej stosowanym sposobem organizacji produkcji przemysłu maszynowego.

5.1. Opis matematyczny analizowanego problemu

Podstawę opracowania metody odporne harmonogramowania produkcji z wykorzystaniem narzędzi predykcji stanowi budowa modelu matematycznego. Takie przedstawienie problemu szeregowania zadań produkcyjnych jest dość często stosowane w literaturze i umożliwia przystępną analizę rozpatrywanego zagadnienia [5, 20].

W celu przedstawienia problemu szeregowania zadań w systemie *job-shop* należy zdefiniować następujące zbiory danych:

- zbiór M , będący zbiorem m maszyn technologicznych realizujących procesy produkcyjne:

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}, \quad (1)$$

- zbiór J , zawierający n zleceń (prac) do wykonania:

$$J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}. \quad (2)$$

Wykonanie pracy J_i na maszynie M_j będzie nosiło nazwę operacji. Dlatego też należy zdefiniować:

- macierz MO o wymiarach $m \times n$ zawierającą informację dotyczącą marszruty technologicznej (kolejności wykonywanych operacji):

$$MO = [o_{ij}], \quad (3)$$

gdzie:

o_{ij} – liczba określająca kolejność wykonywania operacji zadania i na maszynie j przyjmująca wartości:

$$o_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{gdy operacja } i \text{ nie jest wykonywana na maszynie } j \\ \{1, \dots, m\}, & \text{gdy operacja } i \text{ jest wykonywana na danej maszynie} \end{cases}$$

m – liczba maszyn realizujących procesy produkcyjne.

- macierz PT zawierającą informację dotyczącą czasów poszczególnych operacji technologicznych:

$$PT = [p_{ij}], \quad (4)$$

gdzie:

p_{ij} – liczba określająca czas realizacji operacji zadania i na maszynie j ; przy czym:

$$\bigwedge_{o_{ij}=0} p_{ij} = 0. \quad (5)$$

Ponadto w celu uodpornienia harmonogramu nominalnego niezbędne jest zdefiniowanie następujących zbiorów danych:

- zbioru dostępnego zasobu czasu T podzielonego na n równych podzbiorów (przedziałów):

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\} \quad (6)$$

- n -elementowej macierzy FT zawierającej informację dotyczącą potencjalnego wystąpienia awarii w jednym z n przedziałów dostępnego zasobu czasu:

$$FT = [f_i] \quad (7)$$

gdzie:

f_i – wskaźnik określający potencjalnie zagrożony przedział czasu przyjmujący wartości:

$$f_i = \begin{cases} 0, & \text{gdy przedział jest bezpieczny} \\ 1, & \text{gdy przedział jest zagrożony} \end{cases}$$

n – liczba analizowanych przedziałów.

- n -elementowej macierzy buforów czasowych TB zawierającej informację dotyczącą ich wielkości w poszczególnych przedziałach:

$$TB = [t_{bi}] \quad (8)$$

gdzie:

t_{bi} – liczba definiująca wielkość bufora czasowego; przy czym:

$$\bigwedge_{j_i=0} t_{bi} = 0. \quad (9)$$

W celu wyznaczenia wartości elementów macierzy FT oraz TB należy wykorzystać analizę danych historycznych oraz odpowiednio wykorzystane metody predykcji.

5.2. Ogólny schemat szeregowania zadań z wykorzystaniem narzędzi predykcji

Proponowana metoda odpornego szeregowania zadań produkcyjnych ma charakter dwuetapowy. Pierwszy z nich dotyczy analizy oraz predykcji możliwych zakłóceń procesu (awarii maszyn technologicznych). Drugi z etapów polega na zbudowaniu harmonogramu nominalnego i jego uodpornieniu na podstawie danych uzyskanych w etapie poprzednim. Schemat proponowanego rozwiązania został przedstawiony na rysunku 4.

5.3. Problemy badawcze związane z proponowaną metodą

Przedstawiona koncepcja składa się z wielu kroków będących jednocześnie elementami proponowanego algorytmu szeregowania zadań. Każdy z nich wiąże się z występowaniem problemów badawczych wymagających analiz oraz ich rozwiązania. Do najważniejszych problemów związanych z opracowaniem prezentowanej metody należy zaliczyć:

Dobór odpowiedniej metody analizy zgromadzonych danych historycznych

W celu optymalnego wykorzystania zgromadzonych danych historycznych należy opracować odpowiednią metodę ich reprezentacji oraz analizy. Zastosowanie znaleźć tu mogą elementy metody Analizy Czasu Trwania, zwanej także Analizą Przeżycia. Autorzy niniejszej publikacji prowadzili badania w celu wykorzystania tejże metody w celu analizy awaryjności parku maszynowego [23], a rezultaty tych prac należy uznać za zadowalające i rozwojowe. W dalszych badaniach należy głównie zwrócić uwagę na funkcję intensywności (hazardu), która pozwala określić lokalną charakterystykę danego procesu (niestabilność w sensie czasu doznania wydarzenia) oraz zastanowić się na opracowaniem algorytmu identyfikacji potencjalnie zagrożonych maszyn oraz algorytmu szacowania wielkości buforów czasowych.

Zastosowanie modeli prognostycznych

Analiza danych historycznych pozwala uzyskać wiele informacji dotyczących przyszłych awarii parku maszynowego. Jednak w celu opracowania odpornego uszeregowania zadań produkcyjnych niezbędne jest wykorzystanie odpowiedniego modelu prognostycznego. Istnieje zatem potrzeba przeprowadzenia badań w celu doboru predyktora bazującego na przanalizowanych danych historycznych. Rozpatrzyć należy zarówno metody prognostyczne wykorzystujące jeden szereg, składający się z N poprzednich elementów tego samego szeregu (m.in. prostą ekstrapolację, czy metodę wykorzystującą autoregresję), jak i bardziej złożone modele (wykorzystujące dwa „równoległe” szeregi czasowe) [13].

Należy także przeprowadzić badania pod kątem występowania ewentualnych tendencji cyklicznych w przebiegu prawdopodobieństwa wystąpienia awarii – wówczas zastosowanie znaleźć mogą metody wykorzystujące składową o określonej powtarzalność.

Dobór odpowiedniego kryterium celu

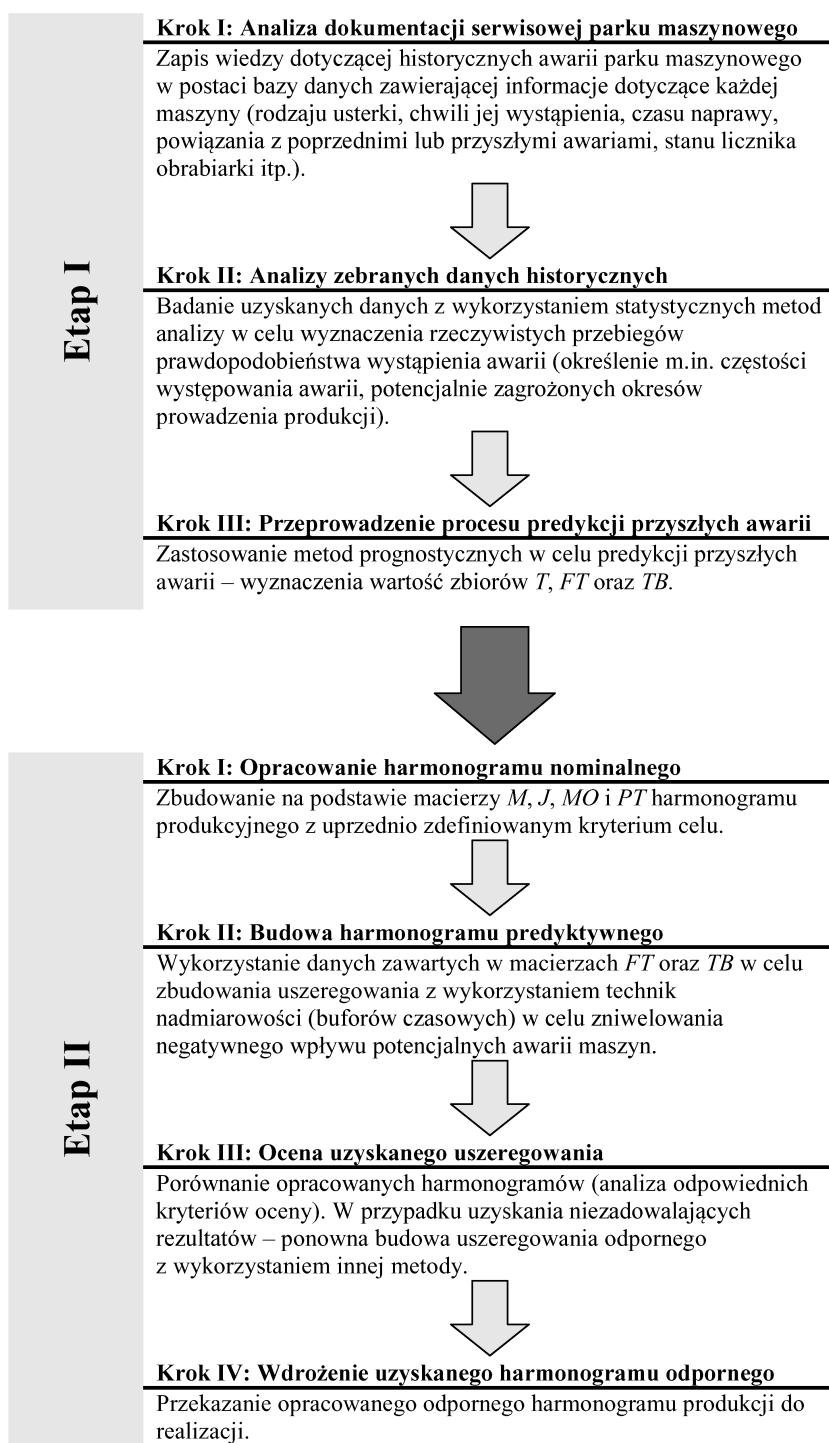
Należy także zdefiniować, które kryterium celu podczas budowy harmonogramu nominalnego będzie najbardziej korzystne z punktu przedsiębiorstwa produkcyjnego. W wielu pracach naukowych badacze analizują głównie kryterium C_{max} (minimalizacji długości cyklu), ponieważ jest ono dobrym odniesieniem podczas porównywania rezultatów działania algorytmów proponowanych przez autorów [18, 20]. Niemniej jednak z punktu widzenia przedsiębiorstw produkcyjnych ważniejsze mogą być inne kryteria [11, 12]. Ponadto niekiedy istnieje potrzeba stosowania odpowiednich priorytetów reguły. Do najważniejszych zalicza się reguły: pierwszy przybył – pierwszy obsłużony, najkrótszego/najdłuższego czasu operacji, najdłuższego czasu następnej operacji, najkrótszego czasu przygotowawczo-zakończeniowego, najdłuższej kolejki, ważonego najkrótszego czasu operacji, maksymalnej wartości zadania [16].

Określenie kryteriów oceny uzyskanego uszeregowania odpornego

Rezultatem proponowanej metody szeregowania zadań produkcyjnych będzie odporny harmonogram produkcyjny. Opracowana metoda powinna zatem uwzględniać proces ewaluacji otrzymanego rozwiązania. Należy przedyskutować dobór odpowiedniego kryterium oceny harmonogramu. W literaturze przedstawianych jest wiele grup wskaźników, które dzieli się na [15]:

- wskaźniki efektywności – nazywane także wskaźnikami wydajności; zalicza się do nich m.in. typowe wskaźniki wykorzystywane w procesie oceny harmonogramowania produkcji w deterministycznych systemach statycznych (długość uszeregowania, maksymalny czas przepływu, średni czas przepływu itp.),
- wskaźniki stabilności – wykorzystywane w procesie oceny rezultatów szeregowania reaktywnego; określane są na podstawie porównywania harmonogramu bazowego i modyfikowanego,
- wskaźniki odporności na zakłócenia – określające stopień absorbowania zakłóceń pojawiających się w trakcie działania systemu produkcyjnego; zalicza się do nich wskaźnik liczby czynności krytycznych, średniego przestoju stanowiska czy sumę buforów czasowych przed zadaniami),
- wskaźniki kosztowe – uwzględniają wszystkie koszty związane z procesem harmonogramowania i reharmonogramowania (koszty obliczeniowe, koszty przebrożeń, koszty organizacyjne i transportowe, koszty nieterminowości).

Z uwagi na fakt, iż proponowana metoda predykcyjnego szeregowania zadań ma znaleźć zastosowanie w szeregowaniu zadań rzeczywistego systemu produkcyjnego wydaje się, iż odpowiednimi wskaźnikami oceny uszeregowania będą wskaźniki odporności na zakłócenia (rozpatrywane głównie w przypadku harmonogramowania predykcyjnego) oraz kosztowe wskaźniki oceny. Precyzyjne określenie wskaźników oceny wymaga jednak szerszych analiz



Rys. 4. Schemat proponowanej metody odpornego szeregowania zadań produkcyjnych

w oparciu o sugestie i oczekiwania przedsiębiorstwa produkcyjnego. Ponadto warto zastanowić się nad wyborem wskaźników najczęściej stosowanych w literaturze. Wówczas daje to możliwość porównania rezultatów szeregowania zadań z wykorzystaniem opracowanej metody z rozwiązaniami proponowanymi przez innych badaczy.

6. Podsumowanie i wnioski

Szeregowanie zadań produkcyjnych z uwzględnieniem antycypacji możliwych zakłóceń jest zagadnieniem bardzo ważnym. Istnieje zatem potrzeba dalszego rozwoju tematyki

szeregowania zadań produkcyjnych w warunkach niepewności. Jest to temat będący przedmiotem szerokich badań i analiz. Należy prowadzić pracę na doskonaleniu metod harmonogramowania produkcji, ale przede wszystkim – niwelowania negatywnych czynników. Autorzy pracy zaprezentowali metodę budowania harmonogramów odpornych z zastosowaniem rzeczywistych danych produkcyjnych oraz narzędzi predykcji. Przedstawione podejście niewątpliwie umożliwi optymalizację harmonogramów produkcyjnych, głównie poprzez zwiększanie ich odporności na zakłócenia.

CONCEPTION OF USING PREDICTION TOOLS IN THE ROBUST SCHEDULES DESIGNING

Key words:

production scheduling, robust schedule, predictive scheduling

Abstract:

The development of competitiveness on world markets caused the need to increase production flexibility. An essential tool in achieving this purpose could be production scheduling. Unfortunately, the production process is associated with presence of numerous random events that negatively affect its course. Therefore, it is necessary to apply appropriate prediction methods which help to reduce its affect. The paper presents the conception of robust production scheduling. The typical scheduling problems and robust scheduling idea are described. Moreover, the current solutions of production scheduling under uncertainty are outlined. Finally, the idea of creating robust schedules based on previous production processes are presented. In the final part of the paper the author presented problems related to proposed idea.

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] Bocewicz G., Banaszak Z., *Cyclic Processes Scheduling*. "Applied Computer Science", Vol. 6, No. 2, 2010, pp. 41-70.
- [3] Chung-Cheng L., Shih-Wei L., Kuo-Ching Y., *Robust Scheduling on a Single Machine to Minimize Total Flow Time*. "Computers & Operations Research", Vol. 39, 7/2012, pp. 1682-1691.

- [4] Davenport A., Gefflot C., Beck C., *Slack-based Techniques for Robust Schedules*. Sixth European Conference on Planning, 2014.
- [5] Deepu P., *Robust Schedules and Disruption Management for Job Shops*. Bozeman, Montana 2008.
- [6] Fox M. S., Smith S. F., *ISIS – a Knowledge-based System for Factory Scheduling*. "Expert Systems", Vol. 1, No. 1, 1984.
- [7] Gürel S., Körpeolu E., Aktürk M. S., *An Anticipative Scheduling Approach with Controllable Processing Times*. "Computers & Operations Research", 37 (2010), pp. 1002-1013.
- [8] Hong G., *Building Robust Schedules using Temporal Protection – An Empirical Study of Constraint Based Scheduling Under Machine Failure Uncertainty*. Toronto, Ontario 1996.
- [9] Humayun Fuad R., Sarker R., Essam D., *A real-time order acceptance and scheduling approach for permutation flow shop problems*. "European Journal of Operational Research", Vol. 247, 2/2015, pp. 488-503.
- [10] Jensen M. T., *Improving Robustness and Flexibility of Tardiness and TotalFlow-Time Job Shops using Robustness Measures*. "Applied Soft Computing", 1 (2001), pp. 35-52.
- [11] Kalinowski K., Krenczyk D., Grabowik C., *Predictive – Reactive Strategy for Real Time Scheduling of Manufacturing Systems*. "Applied Mechanics and Materials", Vol. 307, 2013, pp. 470-473.
- [12] Kalinowski K., *Harmonogramowanie dyskretnych procesów produkcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [13] Kaźmierczak J., *Zastosowanie liniowych modeli procesów losowych do prognozowania w diagnostyce maszyn*. „Mechanika – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, Gliwice 1989.
- [14] Kempa W. M., Wosik I., Skołod B., *Estimation of Reliability Characteristics in a Production Scheduling Model with Time-Changing Parameters – First Part, Theory*, [w:] *Management and Control of Manufacturing Processes*, eds. A. Świć, J. Lipski. Lublin 2011, pp. 7-18.
- [15] Klimek M., *Predyktywno-reaktywne harmonogramowanie produkcji z ograniczoną dostępnością zasobów*. Kraków 2010.
- [16] Konsala R., *Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [17] Leon V. J., Wu S. D., Storer R. H., *Robustness Measures and Robust Scheduling for Job Shops*. "IEE Transactions", Vol. 26, No. 5, 1994.
- [18] Makuchowski M., Tyński A., *Automatyczna mutacja w algorytmach ewolucyjnych*. „Automatyka”, t. 13, z. 2, 2009, s. 443-452.
- [19] Pająk E., *Zarządzanie produkcją – produkt, technologia, organizacja*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [20] Pawlak M., *Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [21] Sarker R., Omar M., Hasan K S. M., Essam D., *Hybrid Evolutionary Algorithm for Job Scheduling under Machine Maintenance*. "Applied Soft Computing", Vol. 13, 3/2013, pp. 1440-1447.
- [22] Skołod B., Wosik I., Kempa W. M., Kalinowski K., *Estimation of Reliability Characteristics in a Production Scheduling Model with Time-Changing Parameters – Second Part, Numerical Example*, [in:] *Management and Control of Manufacturing Processes*, eds. A. Świć, J. Lipski. Lublin 2011, pp. 19-29.
- [23] 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. R. Knosala. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2016, s. 638-650.
- [24] Sobaszek Ł., Gola A., *Koncepcja zastosowania metody analizy przeżycia dla potrzeb predykcji zakłóceń procesu produkcyjnego*, [w:] *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, t. 1, red. R. Knosala. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2015, s. 622-634.
- [25] Sobaszek Ł., *Problemy harmonogramowania w systemach produkcyjnych*. "Technological Complexes", No. 1, 2013, pp. 175-178.
- [26] Szatkowski K., *Nowoczesne zarządzanie produkcją*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2014.
- [27] Wei-Wei C., Zhiqiang L., Ershun P., *Integrated Production Scheduling and Maintenance Policy for Robustness in a Single Machine*. "Computers & Operations Research", 47 (2014), pp. 81-91.

Prof. dr hab. inż. Antoni ŚWIĆ

Mgr inż. Łukasz SOBASZEK

Institut Technologicznych Systemów Informacyjnych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
a.swic@pollub.pl
l.sobaszek@pollub.pl

Dr inż. Arkadiusz GOLA

Katedra Organizacji Produkcji
Wydział Zarządzania
Politechnika Lubelska
a.gola@pollub.pl