

KONCEPCJA ZASTOSOWANIA METODY ANALIZY PRZEŻYCIA DLA POTRZEB PREDYKCJI ZAKŁÓCEŃ PROCESU PRODUKCYJNEGO

Lukasz SOBASZEK, Arkadiusz GOLA

Streszczenie: W pracy zaprezentowano koncepcję zastosowania metody analizy przeżycia w celu identyfikacji i predykcji zakłóceń procesu produkcyjnego. Ponadto, przedstawione zostały współczesne problemy szeregowania zadań produkcyjnych oraz metody uodparniania harmonogramów. Omówiono także wpływ zakłóceń na realizowany proces produkcyjny oraz jego harmonogramowanie. Scharakteryzowano analizę przeżycia oraz zaprezentowano koncepcję wykorzystania tej metody w celu opracowania odpornych harmonogramów produkcyjnych.

Słowa kluczowe: harmonogramowanie odporne, analiza przeżycia, predykcja zakłóceń.

1. Wstęp

Współczesne wymagania rynku zorientowanego na klienta powodują, iż istnieje potrzeba ciągłego doskonalenia procesów produkcyjnych. Przedsiębiorcy, chcąc być konkurencyjnymi, muszą dążyć do optymalnego wykorzystywania zasobów produkcyjnych [1].

Inżynieria Produkcji jest nauką, która poprzez ściśle sprecyzowane obszary badawcze, stara się rozwiązywać różnorodne problemy procesów produkcyjnych. Jednym z istotnych obszarów Inżynierii Produkcji są zagadnienia związane z prognozowaniem, modelowaniem i symulacją komputerową w przedsiębiorstwie. Do wspomnianego działu zalicza się problematykę: prognozowania technologicznego, prognozowania ekonomicznego i prognozowania popytu, modelowania i symulacji projektowania produktów, projektowania procesów, a także harmonogramowania zadań produkcyjnych, projektowania logistyki produkcji oraz zarządzania projektami [2]. Wśród wspomnianej tematyki na szczególną uwagę zasługuje szeregowanie zadań produkcyjnych. Dobór odpowiedniej metody harmonogramowania pozwala w odpowiedni sposób zaplanować proces produkcyjny, a ponadto znaleźć najlepszy wariant jego realizacji [3,4].

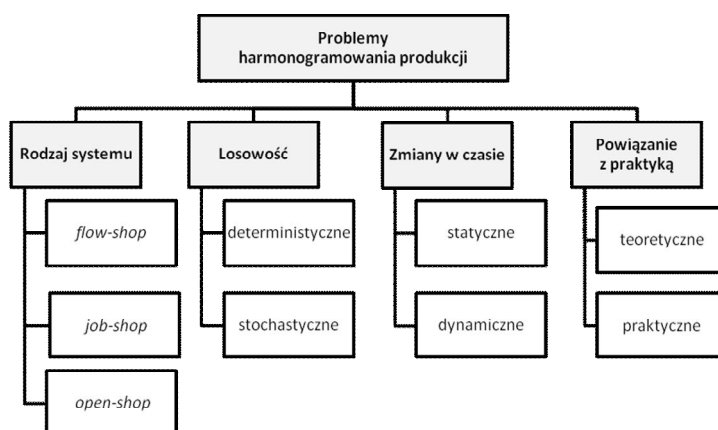
Produkcja jest jednak związana z występowaniem wielu czynników, które mogą negatywnie wpływać na realizację opracowanego harmonogramu, a w konsekwencji całego procesu [5]. Należy zatem dążyć, aby czynniki zakłócające prawidłowy przebieg procesu produkcyjnego były uprzednio identyfikowane, a następnie kompensowane. Stąd też w ostatnim czasie, w wielu pozycjach literaturowych, poruszana zostaje tematyka predykcji zakłóceń procesu produkcyjnego za pomocą różnorodnych metod analizy danych.

2. Współczesne problemy szeregowania zadań produkcyjnych

Z procesem harmonogramowania produkcji związanych jest wiele problemów różnorodnej natury [6]. Podział problemów szeregowania zadań ze względu na ich rodzaj

został przedstawiony na rysunku 1. Analiza literaturowa pozwala jednak wysnuć wniosek, iż przedmiotem aktualnych i licznych badań są:

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



Rys. 1. Podział problemów harmonogramowania produkcji [6]

Harmonogramowanie w systemie *job-shop* można określić jako szeregowanie zadań w typowym środowisku przemysłu maszynowego [5]. Przypadek ten zakłada pełne uporządkowanie zadań wynikające z ograniczeń technologicznych. Analizując problem typu *job-shop* operuje się na trzech zbiorach: maszyn, zadań oraz operacji. Rozwiązaniem tego problemu jest ustalenie odpowiednich relacji pomiędzy poszczególnymi zbiorami, przy uwzględnieniu zakładanego kryterium celu. Dodatkowym problemem jest fakt, iż problemy tej klasy to często problemy NP-trudne. Wówczas znalezienie rozwiązania (w postaci odpowiedniego uszeregowania) w przystępnym czasie jest praktycznie niemożliwe [7,8].

Pozostałe z wymienionych problemów harmonogramowania, które są tematem aktualnych badań, związane są z występowaniem różnorodnych zakłóceń procesu produkcyjnego [9]. Dzieje się tak ponieważ zakłócenia te są ograniczeniami typowo praktycznymi, charakteryzującymi się pewnym dynamizmem oraz stochastycznością. Wśród typowych zakłóceń procesu produkcyjnego wyróżnia się zakłócenia związane z: dostępnością zasobów, zamówieniami, operacjami, błędnym oszacowaniem parametrów rozpoczętego procesu, zakłócenia związane ze zmianą czasu trwania operacji. Istotnym zagadnieniem jest zatem, aby do procesu szeregowania zadań w procesie produkcyjnym podchodzić w sposób praktyczny, gdyż rozwiązania typowo teoretyczne niejednokrotnie nie mają przełożenia na rzeczywistość [5].

Dlatego też w literaturze poruszany jest temat odpornego harmonogramowania produkcji (ang. *robust scheduling*). Podejście to ma na celu tworzenie harmonogramów produkcyjnych, uwzględniających jednocześnie kompensację ewentualnych zakłóceń. Takie podejście pozwala rozwiązywać aktualnie analizowane problemy szeregowania zadań produkcyjnych [10]. Zagadnienie odpornego harmonogramowania produkcji wydaje

się być bardzo istotne, gdyż im więcej zmian procesu, tym większa jego nerwowość i dezorganizacja.

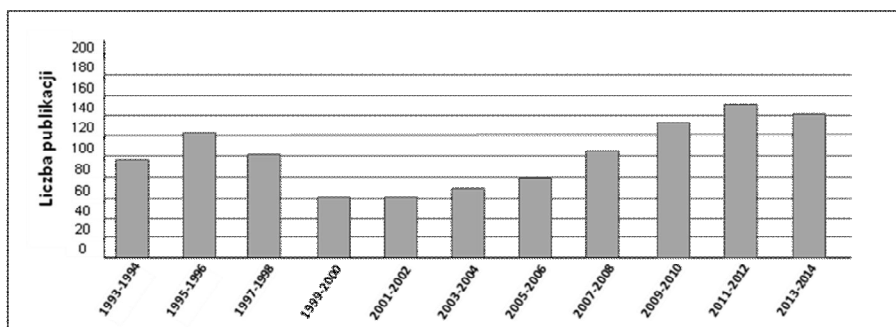
3. Metody uodparniania harmonogramów produkcyjnych

W harmonogramowaniu odpornym wyróżnić można dwie fazy:

- fazę związaną z etapem planowania (fazę off-line, harmonogramowanie predyktywne),
- fazę związaną z etapem realizacji planu (fazę on-line, harmonogramowanie reaktywne).

Podejście predyktywne charakteryzuje się uodparnianiem uszeregowania zadań już na etapie opracowywania harmonogramu. Podejście reaktywne polega natomiast na ciągłej analizie prowadzonego procesu i aktualizowaniu harmonogramu wówczas, gdy wystąpi zdarzenie negatywnie wpływające na realizowany proces [11]. Do najczęściej stosowanych technik uodparniania harmonogramów zalicza się: techniki nadmiarowości, harmonogramowanie warunkowe, budowanie częściowo uporządkowanych harmonogramów oraz analizę wrażliwości uszeregowania [9].

Obecnie w literaturze prezentowane są liczne rozwiązania dotyczące tworzenia odpornych harmonogramów produkcyjnych z wykorzystaniem różnorodnych metod i podejść. Na przełomie lat zaobserwować można znaczący wzrost publikacji naukowych dotyczących problemu odpornego szeregowania zadań (rys. 2).



Rys. 2. Liczba publikacji dotyczących zagadnienia *robust scheduling* na przełomie lat [opracowanie własne]

Autorzy prac dość często porównują metody harmonogramowania predyktywnego oraz reaktywnego, prowadząc przy tym głęboką dyskusję. Dość często pojawiają się pytania:

- Która z metoda powinna być stosowana?
- Czy stosować te metody jednocześnie?
- Jakie są wady i zalety każdej z metod?
- W jakim stopniu jedna metoda przeważa nad drugą?

Prezentowane są autorskie rozwiązania dotyczące uodparniania harmonogramów. Przykładowo w pracach [11,12,13] autorzy analizując dotychczasowe rozwiązania, porównują metody odpornego szeregowania zadań, a także proponują metody predyktywnego harmonogramowania z wykorzystaniem zabezpieczeń czasowych.

W publikacjach [8,14,15] przedstawiane są zalety szeregowania reaktywnego, przy uprzednim uwzględnieniu fazy predyktywnej. Harmonogramowanie *on-line* pozwala

reagować na zakłócenia w trakcie prowadzonego procesu produkcyjnego. Wówczas szeregowanie charakter bardziej dynamiczny i odbywa się w czasie rzeczywistym. Zastosowanie znajdują tu metody tworzenia harmonogramów warunkowych czy też zastosowanie częściowo uporządkowanych uszeregowania.

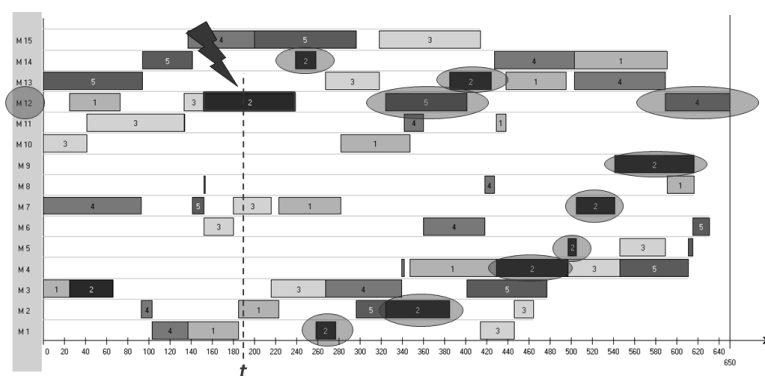
W celu pozyskiwania stabilnych i odpornych harmonogramów produkcyjnych, autorzy licznych publikacji starają się wykorzystywać różnorodne narzędzia. Zastosowanie znajdują m. in.: algorytmy immunologiczne, algorytmy ewolucyjne, systemy ekspertowe czy metody heurystyczne [6,16,17].

Coraz częściej w literaturze znaleźć można także rozwiązania uodporniania harmonogramów z na podstawie informacji dotyczących awaryjności maszyn. Podstawą analizy stają się funkcje rozkładu prawdopodobieństwa [18], czy też funkcje niezawodności oraz wskaźniki MTTF, MTBF oraz MTTR [13]. Zastosowanie znajdują wówczas narzędzia analizy statystycznej.

4. Predykcja zakłóceń procesu produkcyjnego

Jak zostało wspomniane na wstępie, proces produkcyjny związany jest z występowaniem licznych czynników, które mogą wpływać na jego realizację w sposób negatywny.

Wśród wielu możliwych zakłóceń procesu produkcyjnego niewątpliwie szkodliwym zjawiskiem jest awaria maszyny wykorzystywanej w procesie, a także błędne oszacowanie czasów wykonania operacji. Wystarczy awaria jednej maszyny biorącej udział w procesie produkcyjnym, aby operacje realizowane na tej właśnie maszynie, jak też inne operacje wynikające z procesu technologicznego, nie zostały zrealizowane, bądź opóźniły czas realizacji pozostałych zadań. Na rysunku 4 został przedstawiony przykład ilustrujący konsekwencje awarii jednej z maszyn. Defekt maszyny *M12* w czasie *t* powoduje wstrzymanie procesu produkcyjnego – brak możliwości realizacji zadań na uszkodzonej maszynie, a także pozostałych operacji wynikających z marszrutu technologicznego.



Rys. 3. Konsekwencje awarii maszyny *M12* biorącej udział w procesie produkcyjnym [opracowanie własne]

W podobny sposób wpływać będą odstępstwa od normatywnych czasów wykonywania zadań. Krótszy czas realizacji danego zadania będzie powodował niepotrzebne przestoje, zaś wydłużenie czasu realizacji zadania będzie generowało opóźnienia. Zatem odstępstwo

od czasu normatywnego należy również traktować jako czynnik negatywnie wpływający na realizowany proces.

Podejście odporne do procesu harmonogramowania produkcji pozwala na kompensację możliwych zakłóceń. Każdy harmonogram już w chwili realizacji pierwszych zadań staje się nieaktualny, gdyż istnieje ryzyko wystąpienia zakłócenia. Dlatego też tworzenie stabilnych uszeregowień jest związane z predykcją czynników negatywnie wpływających na realizowany proces.

Pod pojęciem predykcji rozumie się „statystyczny proces wnioskowania o przyszłych wielkościach zmiennych losowych w określonym przyszłym momencie (okresie), gdy nie jest znana wielkość wyjściowa” [19]. Predykcja daje zatem możliwość analizy procesów bieżących, jak i historycznych, a następnie na ich podstawie pozwala na formułowanie wniosków na przyszłość. Predykcję zdarzeń prowadzi się za pomocą różnorodnych metod, analiz i narzędzi statystycznych. Wykorzystywana jest ona w wielu obszarach nauki.

Predykcja może być także zastosowana w szeregowaniu zadań produkcyjnych. Niekorzystne zjawiska można traktować jako zmienne losowe, gdyż zdarzenia te mają charakter stochastyczny [20]. Wynikiem predykcji jest prognoza, dlatego też termin „predykcja” jest często używany jako synonim prognozowania [19]. Wnioskowanie o przyszłości procesów produkcyjnych na podstawie danych historycznych jest niewątpliwie ważnym elementem tworzenia odpornych harmonogramów produkcyjnych.

5. Analiza przeżycia

Wśród wielu metod analizy danych na szczególną uwagę zasługuje analiza przeżycia. Metoda ta jest zwana także analizą czasu trwania [21]. Pozwala ona określić model przeżycia konkretnego obiektu czy zjawiska, a także wykorzystać analizowane dane w celu predykcji wzorców przeżywania [20].

5.1. Informacje ogólne

Pod pojęciem „analiza przeżycia” rozumie się statystyczne techniki analizy danych. Termin ten jest tłumaczony wprost z języka angielskiego (*survival analysis*) i w takiej postaci przyjął się w języku polskim. W literaturze stosowane są jednak także inne określenia – m.in.: *survival data analysis*, *lifetime data analysis*, *life testing* czy *analysis of failure time data* [20].

Podstawą tej metody jest proces „trwania”, który charakteryzuje się pewną zależnością – występowaniem dwóch zdarzeń – początkowego oraz końcowego [21]. W przypadku życia człowieka, będzie to chwila narodzin i chwila śmierci. W przypadku osoby bezrobotnej – dzień zwolnienia z pracy oraz dzień ponownego zatrudnienia. W przypadku pracy maszyny – chwila rozpoczęcia pracy oraz chwila awarii [22].

Analiza przeżycia traktuje czas pomiędzy zdarzeniami jako typową zmienną losową. Takie podejście pozwala na opracowanie modelu przeżycia, który jest rozkładem prawdopodobieństwa tej zmiennej, przyjmującej wartości dodatnie. W konsekwencji możemy analizować różnorodne zjawiska bądź zachowania obiektów. Przykładowo, analiza przeżycia może być pomocnym narzędziem wówczas, gdy [20]:

- Urządzenie rozpoczyna pracę w czasie $t = 0$ i interesuje nas prawdopodobieństwo, iż będzie ono działało w dowolnym czasie t w przyszłości;
- Człowiek rodzi się w chwili $t = 0$ i interesuje nas jak długo będzie żył;

- Właściciel wykupuje w czasie $t = 0$ polisę ubezpieczeniową odpowiedzialności cywilnej i interesuje nas jakie jest prawdopodobieństwo, iż w przeciągu roku jego jazda będzie bezkolizyjna.

Opracowanie modelu przeżycia odbywa się z wykorzystaniem danych historycznych, jednak jak można zauważyć na podstawie zaprezentowanych przykładów – analiza przeżycia może być także podstawą predykcji.

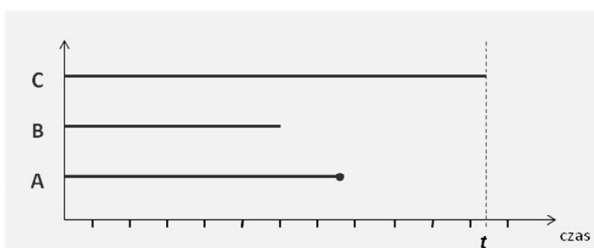
Techniki wykorzystywane w ramach analizy przeżycia początkowo były stosowane wyłącznie w naukach medycznych i biologicznych, aktualnie znajdują jednak zastosowanie w naukach społecznych oraz ekonomicznych, a także (co z punktu widzenia Inżynierii Produkcji jest najistotniejsze) w naukach technicznych [23].

5.2. Podstawowe pojęcia

W celu poprawnego wykonywania analizy czasu trwania, istotna jest znajomość podstawowych pojęć i terminów stosowanych w ramach tej metody. Z punktu widzenia prowadzonych obserwacji definiuje się następujące pojęcia [24]:

- **Zdarzenie** – jest to każda zmiana w wartości cechy pierwotnej; zdarzeniem będzie przejście z jednego stanu w drugi (np. śmierć pacjenta, awaria maszyny).
- **Czas przeżycia** – czas pomiędzy stanem początkowym, a stanem końcowym (np. czas od rozpoczęcia terapii, do momentu wyzdrowienia pacjenta).
- **Obserwacja ucięta** (*censoring*) – jest to typowe zagadnienie analizy przeżycia i oznacza utratę „obiekta obserwacji” z powodu innego, niż zdarzenie końcowe lub udział obiektu aż do zakończenia obserwacji (np. utraciliśmy kontakt z pacjentem, osoba została usunięta z badań, osoba nie doświadczyła „zdarzenia”).

Wyżej wymienione pojęcia zostały zilustrowane na rysunku 4. Obiekt A jest przykładem obserwacji kompletnej – w pewnej chwili wystąpiło pożądane zdarzenie. Obiekty B i C, są przykładem obserwacji uciętych. Przyczyna „utrąty” obiektu B była inna niż pożądane zdarzenie, natomiast obiekt C „przeżył” całkowity czas obserwacji.



Rys. 4. Przykłady obserwacji [opracowanie własne]

W analizie przeżycia czas wystąpienia zdarzenia (czas trwania) traktowany jest jako zmienna losowa T należąca do przedziału $(0, \infty)$, a zatem istotnym elementem tej metody będzie opis matematyczny w postaci odpowiednich funkcji probabilistycznych. Do podstawowych funkcji zalicza się [20]:

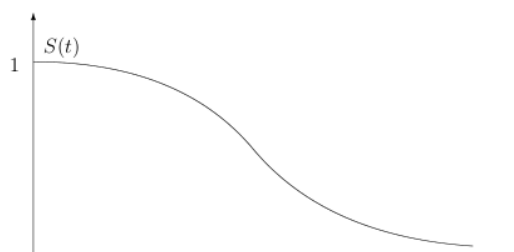
1. **Funkcję gęstości prawdopodobieństwa $f(t)$.** Funkcja ta jest funkcją nieujemną i reprezentuje ona prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia w tym sensie, że $f(t)\Delta t$ można rozumieć jako przybliżenie prawdopodobieństwa, iż zdarzenie nastąpi w czasie t . W badaniach empirycznych funkcja gęstości prawdopodobieństwa służy do przybliżenia empirycznego rozkładu liczby zdarzeń.

2. **Dystrybuantę $F(t)$** . Określa ona prawdopodobieństwo, iż obiekt „nie przeżyje” czasu t , a więc zdarzenie wystąpi w czasie $(0, t]$:

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (1)$$

3. **Funkcję trwania $S(t)$** . Nazywana jest także funkcją dożycia lub przeżycia (rysunek 5). Jest dopełnieniem dystrybuanty do wartości jeden, a zatem określa prawdopodobieństwo, iż obiekt będzie trwał dłużej niż do chwili t . W teorii niezawodności jest ona nazywana funkcją niezawodności i oznaczana $R(t)$. Jest kluczowym pojęciem analizy przeżycia.

$$S(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (2)$$



Rys. 5. Kształt funkcji przeżycia [25]

4. **Funkcję intensywności $\lambda(t)$** . Jest ona warunkową funkcją gęstości wystąpienia wydarzenia w chwili t . Intensywność, to lokalna charakterystyka danego procesu, która określa jego niestabilność w sensie czasu doznania wydarzenia. Określana jest także jako funkcja hazardu. Jeżeli intensywność maleje – oznacza to, że im obiekt dłużej funkcjonuje, tym prawdopodobieństwo doznawania zdarzenia w kolejnym przedziale czasu jest mniejsze. Wysokie wartości funkcji intensywności informują o okresie w którym ryzyko zdarzenia jest wysokie.

$$\lambda(t) = \frac{d \ln S(t)}{dt} \quad (3)$$

Opis matematyczny metody jest oczywiście bardziej rozbudowany, a pomiędzy poszczególnymi jego elementami zachodzi wiele zależności. Informacje te są przedstawione szczegółowo w publikacjach [20,25].

5.3. Stosowane techniki analityczne

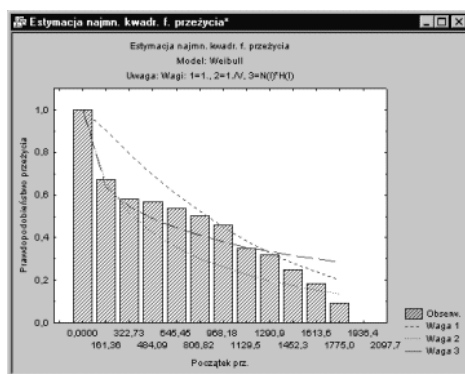
Analiza przeżycia, jak zostało wspomniane na wstępie niniejszego rozdziału, jest zbiorem technik i metod analitycznych. Są te techniki stosowane także w innych procedurach, jednak metody zastosowane w analizie przeżycia mogą operować na danych uciętych [23].

Poniżej przedstawiono podstawowe metody stosowane w analizie przeżycia, które można także wykonać za pomocą oprogramowania STATISTICA.

1. **Analiza tablic trwania życia**. Technika ta należy do grupy najstarszych metod analizy danych dotyczących czasu trwania. Dane zostają pogrupowane w przedziały

i umieszczone w odpowiedniej tabelicy (tabeli). Dla każdego z przedziałów określa się liczbę obiektów, które weszły „żywe” do danego przedziału, a także liczbę przypadków które uległy awarii (obserwacja kompletna) lub zostały utracone (obserwacja ucięta). W oparciu o te dane oblicza się liczbę przypadków zagrożonych, proporcje przypadków ulegających awarii lub przypadków przeżywających. Tak przetworzone dane służą także do określania gęstości prawdopodobieństwa, stopy hazardu czy mediany czasu przeżycia [26].

2. **Dopasowywanie rozkładu.** Technika ta pozwala na dopasowanie teoretycznego rozkładu awarii w czasie dla danych empirycznych (rysunek 6). Do danych z tabelicy przeżycia dobierany jest odpowiedni rozkład (wykładniczy, liniowo wykładniczy, Weibulla, Gomperta). Estymacja odbywa się w oparciu o algorytm regresji liniowej najmniejszych kwadratów. Dopasowany rozkład posłużyć może do celów predykcyjnych [23].



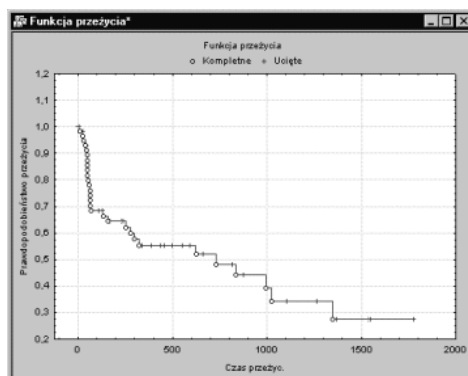
Rys. 6. Wykres przedstawiający dopasowywanie rozkładu [26]

3. **Estymacja Kaplana-Meiera.** Metoda ta polega na szacowaniu funkcji przeżycia bezpośrednio z ciągłych czasów przeżycia lub bezawaryjności. Dane traktowane są w taki sposób, że każdy przedział zawiera dokładnie jeden przypadek zdarzenia. Funkcja przeżycia określana jest wówczas jako iloczyn kolejnych prawdopodobieństw z przedziałów [21]:

$$S_n(t) = \prod_{t_j \leq t} \left(1 - \frac{d_j}{r_j}\right) \quad (4)$$

gdzie: $S_n(t)$ – oszacowana funkcja przeżycia,
 Π – symbol iloczynu,
 r_j – liczba narażonych w okresie t_j ,
 d_j – liczba zdarzeń w okresie t_j .

Estymowane dane można przedstawić za pomocą wykresu schodkowego (rysunek 7) na którym obserwacje ucięte i kompletne są identyfikowane za pomocą odpowiednich znaczników [26].



Rys. 7. Wykres estymowanej funkcji przeżycia [26]

4. **Porównywanie prób.** Analiza przeżycia umożliwia porównywanie czasu przeżycia lub bezawaryjności w dwóch lub więcej próbach. Zastosowanie znajdują tu testy (najczęściej nieparametryczne, do których zalicza się: uogólnienia Gehana test Wilcoxona, test Coxa-Mantela, test F Coxa, test log-rank, uogólnienie Peto i Peto test Wilcoxona). Testy te należy stosować przy dużych próbach, gdyż zastosowanie dla mniejszych prób nie jest do końca zbadane.
5. **Modele regresji.** Z punktu widzenia prowadzonych badań, dość często ważnym zagadnieniem jest uzyskanie odpowiedzi na pytania: „Od czego może zależeć czas poprawnej pracy, czy też długość przeżycia?”, „Czy na dany proces mają wpływ pewne zmienne ciągłe (są skorelowane z czasami)?”. W uzyskaniu odpowiedzi na te pytania mogą być pomocne następujące modele stosowane w analizie przeżycia [23]:
 - model proporcjonalny Coxa,
 - model proporcjonalny hazardu Coxa z zmiennymi objaśniającymi zależnymi od czasu,
 - model regresji wykładniczej,
 - normalny model regresji liniowej,
 - Log-normalny model regresji liniowej.

5.3. Obszary zastosowania analizy przeżycia

Analiza przeżycia znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach. Warto wymienić takie obszary jak: badania społeczne (badanie płynności kadr, stanu bezrobocia), ekonomię (badania czasu magazynowania towarów), zarządzanie i marketing (czas od wyprodukowania do zainstalowania urządzenia), demografię (analizy procesu wymieralności ludności), naukę aktuarialną (konstruowanie tablic trwania życia), biologię (badanie polucji dziko żyjących zwierząt) czy medycynę (analizy skuteczności prowadzonej terapii, czas funkcjonowania stymulatorów serca) [20].

Analizowanie czasów trwania może także znaleźć zastosowanie w technice. Już w latach pięćdziesiątych inżynierowie interesowali się analizą przeżycia. Umasowienie produkcji elementów i urządzeń elektronicznych dla wojskowości spowodowało zmniejszenie ich niezawodności. W związku z tym poruszana zaczęła być tematyka analizy niezawodności. Ciekawostką może być także fakt, iż analiza przeżycia (tablice trwania) stosowane były także w czasach II Wojny Światowej. Stosowano je

w określaniu wymaganej rezerwy bombowców B-21 w rejonie Pacyfiku – chodziło o określenie jaka frakcja kohorty może być zestrzelona po miesiącu służby, pod dwóch miesiącach, itd. [20].

Wydaje się jednak, iż obecnie w obszarze badań technicznych metoda ta nie jest zbyt popularna. Analiza danych dostarczyć może badaczowi wiele interesujących informacji dotyczących badanych procesów oraz obiektów, które mogą być podstawą predykcji ich zachowań. Taka wiedza – przykładowo – może być pomocna w procesie harmonogramowania procesu produkcyjnego. Dlatego też w następnym punkcie zostanie zaprezentowana koncepcja zastosowania metody analizy przeżycia dla potrzeb predykcji awarii parku maszynowego realizującego proces produkcyjny.

6. Koncepcja zastosowania analizy przeżycia w celu predykcji zakłóceń procesu produkcyjnego

Awaria maszyny jest zdarzeniem, które uniemożliwia dalsze prowadzenie procesu produkcyjnego. Harmonogram, który opracowywany jest przed rozpoczęciem produkcji zakłada bezproblemowy przebieg tego procesu. Jednak realne środowisko związane jest z występowaniem pewnych stochastycznych zdarzeń, jakim może być właśnie awaria.

Dlatego też autorzy niniejszej pracy w publikacjach [5,7] przedstawili propozycję odpornego harmonogramowania produkcji, którą składa się z następujących etapów:

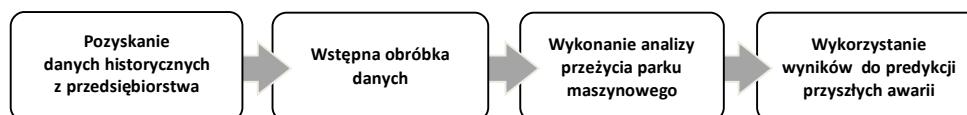
- **Etap 1** – Analiza danych procesu produkcyjnego i opracowanie nominalnego harmonogramu produkcji.
- **Etap 2** – Wykorzystanie danych historycznych dotyczących procesu w celu identyfikacji możliwych zakłóceń procesu.
- **Etap 3** – Utworzenie harmonogramu odpornego na podstawie przetworzonych danych historycznych.
- **Etap 4** – Ocena odporności utworzonego harmonogramu, a także porównanie jakości harmonogramu nominalnego z uszeregowaniem odpornym.

Analizując charakterystykę oraz możliwości analizy czasu trwania, można stwierdzić, iż metoda może znaleźć zastosowanie w **Etapie 2** tworzenia odpornych harmonogramów produkcyjnych.

Proponowana koncepcja analizy przeżycia parku maszynowego opiera się na następujących założeniach:

- obiektami obserwacji są maszyny realizujące proces produkcyjny;
- czasem przeżycia badanych obiektów będzie czas ich bezawaryjnej pracy;
- dane historyczne powinny obejmować okres minimum roku (częstość występowania awarii może być dość mała);
- uzyskane dane powinny być podzielone na grupy umożliwiające analizę w obrębie jednego miesiąca;
- jako zdarzenie początkowe przyjmuje się rozpoczęcie obserwacji procesu produkcyjnego w pierwszym dniu danego miesiąca;
- zdarzeniem końcowym dla danej maszyny jest chwila jej uszkodzenia (poprzez uszkodzenie należy rozumieć defekt powodujący brak możliwości realizowania procesu produkcyjnego na danej maszynie);
- dla danych uzyskanych w wyniku obserwacji należy przeprowadzić analizę przeżycia z zastosowaniem dostępnych technik analiz statystycznych.

Koncepcję opartą na powyższych założeniach można przedstawić za pomocą następującego schematu (rysunek 8):



Rys. 8. Kolejne etapy proponowanej koncepcji [opracowanie własne]

Pierwszym etapem proponowanego rozwiązania jest **pozyskanie danych historycznych**. Podstawę pozyskania stanowią tu mogą takie dokumenty jak karta pracy maszyny/urządzenia lub książka pracy i konserwacji. Dokumentacja ta zawiera informacje dotyczące historii pracy urządzenia. W ten sposób pozyskać można dane dotyczące czasu wystąpienia awarii, a więc informacji niezbędnych do wykonania analizy przeżycia.

Wstępna obróbka danych pozwoliłaby na wyselekcjonowanie obserwacji istotnych z punktu widzenia prowadzonych analiz (zidentyfikowanie obserwacji kompletnych i uciętych), a także opracowanie danych w formie możliwej do zaimplementowania w odpowiednim oprogramowaniu umożliwiającym wykonanie analiz. Do tego celu wykorzystać można oprogramowanie STATISTICA, posiadające bogate możliwości przeprowadzenia analizy przeżycia.

Wykonanie analizy przeżycia obejmować może zastosowanie wybranych technik. Możliwości wykorzystania odpowiedniej metody zostały przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Wykorzystanie technik analizy przeżycia [opracowanie własne]

Technika analizy przeżycia	Zastosowanie
Analiza tablic trwania życia	Określenie awaryjności obrabiarek w analizowanych okresach.
Dopasowywanie rozkładu	Zdefiniowanie charakteru pojawiających się zakłóceń.
Estymacja Kaplana-Meiera	Obliczenie funkcji przeżycia w celu porównania z otrzymanymi tablicami awaryjności.
Porównywanie prób	Porównanie przypadków defektów w różnych okresach czasu (np. w czasie bardziej lub mniej obciążonym produkcją).
Modele regresji	Zbadanie jakie czynniki mają wpływ na występowanie awarii (np. Jak częstość przeglądów maszyny wpływa na jej awaryjność? Jaki wpływ na awaryjność ma rodzaj prowadzonego procesu?)

Wyniki przeprowadzonej analizy mogą zostać wykorzystane podczas uodparniania harmonogramu produkcyjnego. Określenie prawdopodobieństw bezawaryjnej pracy maszyn w danych odstępach czasu może być pomocna w identyfikacji okresów, kiedy produkcja będzie mogła przebiegać bez ryzyka przerwania procesu. Na podstawie analizy czasu trwania można także zidentyfikować maszyny, które najczęściej są zagrożone ryzykiem uszkodzenia, a przez to zwracać na nie szczególną uwagę w procesie harmonogramowania, jak też realizacji produkcji.

7. Podsumowanie

Proces produkcyjny związany jest z występowaniem pewnych zakłóceń, których natura nie do końca jest poznana. Czynniki te wpływają negatywnie zarówno na proces

prowadzenia produkcji, jak i jej planowania. Dlatego też, autorzy współczesnych rozwiązań dotyczących szeregowania zadań produkcyjnych starają się uwzględniać możliwe zakłócenia procesów produkcyjnych. Pomocnym narzędziem w realizacji tego celu może okazać się analiza przeżycia, która umożliwi analizę awaryjności parku maszynowego realizującego procesy produkcyjne. Na podstawie szeregu publikacji wysnuć można tezę, iż metoda ta może znaleźć szerokie zastosowanie w predykcji zdarzeń losowych.

W celu przeprowadzenia analizy przeżycia niezbędne są jednak dane historyczne, które należałoby pozyskać z przedsiębiorstw. Autorzy niniejszej publikacji czynią starania w kierunku pozyskania danych empirycznych. Niestety, dość często przedsiębiorstwa nie prowadzą ewidencji awaryjności parku maszynowego, bądź nie wyrażają zgody na ich udostępnienie, co utrudnia proces pozyskania rzetelnych danych dla potrzeb weryfikacji przyjętych założeń.

Literatura

1. Gola A.: Wybrane problemy planowania produkcji wieloasortymentowej o popycie sezonowym. *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji – t. 1*, [red:] Knosala R., Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2014, s. 528-239.
2. Gola A., Świć A.: Współpraca nauka-biznes w Inżynierii Produkcji – problemy i wyzwania. *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, [red:] Knosala R., Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2013, s. 1277-1288.
3. Skołod B., Wosik I.: Algorytmy immunologiczne w szeregowaniu zadań produkcyjnych. *Zarządzanie Przedsiębiorstwem*, Nr 1 (2008), s. 47-48.
4. Seman P.: Minimizing makespan in general flow-shop scheduling problem using a GA-based improvement heuristic. *Applied Computer Science*, vol. 7, no. 1, 2011, pp. 57-64.
5. Sobaszek Ł., Gola A., Świć A.: Analiza problemu job-shop z uwzględnieniem zakłóceń procesu produkcyjnego. *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji – t. 1*, [red:] Knosala R., Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2014, s. 658-669.
6. Pawlak M.: Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1999.
7. Sobaszek Ł., Świć A., Gola A.: Creating robust schedules based on previous production processes. *Actual Problems of Economics*, No. 8 (158) 2014, pp. 488-495.
8. Kalinowski K., Krenczyk D., Grabowik C.: Predictive – reactive strategy for real time scheduling of manufacturing systems. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 307, 2013, p. 470-473.
9. Klimek M., Łebkowski P.: Harmonogramowanie odporne procesu technologicznego montażu. *Przegląd Mechaniczny*, nr 12, 2008, s. 37-40.
10. Gola A., Sobaszek Ł., Świć A.: Selected problems of modern manufacturing systems design and operation. *Robotics and Manufacturing Systems*, Lublin, 2014, p. 56-68.
11. Gao H.: Building Robust Schedules Using Temporal Protection – an Empirical Study of Constraint Based Scheduling Under Machine Failure Uncertainty. Graduate Department of Industrial Engineering, University of Toronto, 1996.
12. Deepu P.: Robust Schedules and Disruption Management for Job Shops. Montana State University, Bozeman, Montana, 2008.

13. Paprocka I., Urbanek D.: A numerical example of Total Production Maintenance and robust scheduling application for a production system efficiency increasing. *Journal of Machine Engineering*. 12, No. 3, 2012, s. 62-78.
14. Donya Rahmani, Mahdi Heydari: Robust and stable flow shop scheduling with unexpected arrivals of new jobs and uncertain processing times. *Journal of Manufacturing Systems*, 33 (2014), p. 84–92.
15. Kalinowski K.: Harmonogramowanie dyskretnych procesów produkcyjnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013.
16. Xingquan Zuo, Hongwei Mob, Jianping Wua: A robust scheduling method based on a multi-objective immune algorithm. *Information Sciences*, 179 (2009), p. 3359–3369.
17. Yang B., Geunes J.: Predictive–reactive scheduling on a single resource with uncertain future jobs. *European Journal of Operational Research*, 189 (2008), p. 1267-1283.
18. Stacy L. Janak, Xiaoxia Lin, Christodoulos A. Floudas: A new robust optimization approach for scheduling under uncertainty; II. Uncertainty with known probability distribution. *Computers and Chemical Engineering*, 31 (2007), p. 171-195.
19. Encyklopedia PWN: <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/predykcja;3962016.html> [10 styczeń 2015 r.]
20. Balicki A.: *Analiza przeżycia i tablice wymieralności*. PWE, Warszawa, 2006.
21. Sokołowski A.: Jak rozumieć i wykonać analizę przeżycia. *Materiały Internetowej Czytelni StatSoft*, s. 33-38.
22. Miszkiel L.: Analiza momentu padnięcia bramki podczas Mistrzostw Świata w piłce nożnej. *Materiały Konferencji Naukowej „Zastosowanie metod ilościowych w analizach piłkarskich”*, 11 maja 2012, http://knmi.wzr.pl/docs/wlasne_programy/przezycie_bramki.pdf [12 grudzień 2014 r.]
23. *STATISTICA PL dla Windows: Statystyki II, tom III*, 1997.
24. Stanisław A.: *Analiza przeżycia*. *Medycyna praktyczna dla lekarzy*, <http://www.mp.pl/artykuly/12470> [04 grudzień 2014 r.]
25. Magiera R., Jokiel-Rokita A., Wilczyński M.: *Metody analizy funkcji przeżycia*. Strona internetowa Koła Naukowego Statystyki Matematycznej GAUSS: <http://prac.im.pwr.wroc.pl/~gauss/o-specjalnosci/statystyka-jako-klucz-do-wyboru-optimalnych-strategii/metody-analizy-funkcji-przezycia> [10 styczeń 2015 r.]
26. StatSoft (2006). *Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL*, Krakow, WEB: <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>

Mgr inż. Łukasz SOBASZEK
Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych
Wydział Mechaniczny
Dr inż. Arkadiusz GOLA
Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa
Wydział Zarządzania
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel.: (81) 538 42 76; (81) 538 44 83
e-mail: l.sobaszek@pollub.pl
a.gola@pollub.pl