

Krzysztof Ligier<sup>1</sup>  
 Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
 Anna Mazur  
 Politechnika Poznańska<sup>2</sup>

## Wspomaganie podejmowania decyzji w zarządzaniu częściami zamiennymi dla potrzeb służb utrzymania maszyn

### 1. PROBLEMY ZARZĄDZANIA CZĘŚCIAMI ZAMIENNYMI

Zarządzanie zapasami należy do zagadnień często poruszanych w literaturze dotyczącej logistyki, ze względu na wagę tego zagadnienia [2, 4, 5, 8, 9]. Jednak, w zdecydowanej większości publikacji, uwaga autorów jest skupiona na sterowaniu zapasami w produkcji i dystrybucji, bez uwzględnienia specyfiki zarządzania zapasami części i materiałów dla potrzeb służb utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie. Samo utrzymanie ruchu może być traktowane jako działanie zabezpieczające proces produkcyjny [3, 7, 10], a zapewnienie (zabezpieczenie) ciągłości produkcji wymaga posiadania zapasów części zamiennych, których zużycie wynika z losowego charakteru występowania uszkodzeń.

Gospodarowanie częściami zamiennymi w przedsiębiorstwie napotyka na szereg problemów. Problemy te związane są z następującymi czynnikami [11, 12]:

- wysoką liczbą części i ich różnorodnością;
- zróżnicowanym poziomem zużycia różnych typów części;
- brakiem pewnego i niezawodnego kryterium prognozowania, kiedy i ile części będzie potrzebnych;
- zróżnicowaną dostępnością części na rynku.

Powyższe problemy skutkują zbyt dużymi stanami magazynowymi części zamiennych, co znacznie zwiększa koszty utrzymania ruchu. Do najczęstszych przyczyn zbyt dużych stanów magazynowych części zamiennych zaliczyć można [11, 12]:

- zakupy części rekomendowanych przez producentów maszyn;
- zakupy części w ilościach przekraczających potrzeby;
- chęć zapewnienia dostępności części na wypadek awarii;
- pozostawianie w magazynie części po zmodyfikowanych lub wycofanych z eksploatacji maszynach i urządzeniach;
- utrzymywanie zapasów części o długim czasie dostawy.

Główne zagadnienia związane z optymalizacją zapasów części zamiennych związane są z [11]:

- redukcją kosztów magazynowania;
- redukcją prawdopodobieństwa braku części w chwili awarii maszyny;

<sup>1</sup> Dr inż. K. Ligier, adiunkt, Uniwersytet Warmińsko – Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Budowy Eksploatacji Pojazdów i Maszyn.

<sup>2</sup> Dr inż. A. Mazur, adiunkt, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, Katedra Ergonomii i Inżynierii Jakości.

- powiązaniem poziomu zapasów części z krytycznością urządzeń;
- przewidywaniem potrzeb i optymalnego poziomu zapasów;
- wytypowaniem części do magazynowania.

Podstawowe trudności związane z zarządzaniem zapasami części zamiennych dotyczą:

a) utrzymania równowagi pomiędzy:

- ilością części w magazynie;
- kosztami utrzymania zapasów;

b) problemami decyzyjnymi:

- kiedy zamawiać?;
- jakie części zamawiać?
- ile zamawiać jednorazowo?

Problemy decyzyjne: kiedy, co i ile zamówić w gospodarowaniu częściami zamiennymi powinny zostać rozwiązane w odniesieniu do różnych kategorii części.

## 2. KLASYFIKACJA CZĘŚCI ZAMIENNYCH I MATERIAŁÓW EKSPLOATACYJNYCH W ASPEKTCIE LOGISTYKI

Poprawne gospodarowanie częściami zamiennymi wymaga podziału wykorzystywanych w przedsiębiorstwie części i materiałów na odpowiednie kategorie. Podział wykorzystywanych części na kategorie i ich analiza służy wyborowi części do przechowywania i pozwala na obniżenie kosztów utrzymania zapasów poprzez obniżenie liczby pozycji magazynowych.

Jednym z kryteriów podziału jest standaryzacja części. Przystępując do kategoryzacji części należy, opierając się na dokumentacji technicznej, dokonać dekompozycji obiektu na zespoły, zespołów na podzespoły, a podzespołów na części i przyporządkować wszystkie części do jednej z poniższych kategorii:

- części specjalne - stosowane w maszynach określonego typu i niewymienne z innymi maszynami. Części tej kategorii najczęściej produkowane są przez ograniczoną liczbę producentów, co sprawia, że części te są drogie i czas ich dostawy może być długi;
- części standardowe - są to części typowe, zgodne z normami, produkowane przez wielu niezależnych producentów, wymienne pomiędzy różnymi maszynami i producentami. Przykłady tego rodzaju części to łożyska toczne, pasy napędowe, uszczelnienia itp.;
- materiały eksploatacyjne - są to materiały jednorazowego użytku, o niskiej wartości jednostkowej i łatwo dostępne.

Innym kryterium podziału jest wielkość zużycia danej części lub materiału. Wyróżnia się tutaj:

- części wolno-rotujące;
- części szybko-rotujące.

Największe problemy decyzyjne dotyczące zamawiania sprawiają części specjalne zaliczane jednocześnie do części wolno-rotujących. Ta grupa części zamiennych charakteryzuje się dużą nieregularnością wydań,

wysoką wartością jednostkową i często długim czasem dostawy. Jednocześnie brak tych części w magazynie w chwili awarii, może powodować duże straty związane z przestojami maszyn istotnych dla realizacji procesu produkcyjnego. Ta grupa części sprawia problemy związane z decyzją: zamawiać czy nie zamawiać?

W podejmowaniu decyzji o zamawianiu można wykorzystać analizę niezawodności części maszyn lub całych zespołów ulegających uszkodzeniom. Bardzo przydatna może się okazać „analiza przeżycia”, czyli oszacowanie czasu poprawnej pracy do wystąpienia uszkodzenia. Jako narzędzie tej analizy można wykorzystać rozkład Weibulla.

### 3. ROZKŁAD WEIBULLA

Rozkład Weibulla jest to ciągły rozkład prawdopodobieństwa często stosowany w niezawodności do modelowania sytuacji, gdy prawdopodobieństwo uszkodzenia zmienia się w czasie.

Gęstość rozkładu określana jest wzorem:

$$f(t) = \frac{a}{b} t^{a-1} e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^a}$$

dla  $t \geq 1$ , (1)

a dystrybuanta zmiennej losowej ma postać [1]:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^a}$$

(2)

Gdzie:

a, b – parametry rozkładu;

e – podstawa logarytmu naturalnego.

Rozkład Weibulla jest rozkładem o dwóch parametrach:

$a > 0$  – parametr kształtu;

$b > 0$  – parametr skali.

Parametr skali określa, po jakim czasie uszkodzeniu ulegnie  $1 - 1/e = 63,2\%$  populacji natomiast parametr kształtu rozkładu określa zachowanie prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia w czasie [1]:

- dla  $a < 1$  prawdopodobieństwo uszkodzenia maleje z czasem. W przypadku modelowania awarii urządzenia sugeruje to, że egzemplarze mogą posiadać wady fabryczne i powoli wypadają z populacji.
- dla  $a = 1$  (rozkład wykładniczy) prawdopodobieństwo uszkodzenia jest stałe. Sugeruje to, że uszkodzenia mają charakter zewnętrznych zdarzeń losowych.
- dla  $a > 1$  prawdopodobieństwo uszkodzenia rośnie z czasem. Sugeruje to zużycie części z upływem czasu jako główną przyczynę uszkodzeń – uszkodzenie wywołane zmęczeniem.

Zastosowanie rozkładu Weibulla umożliwia określenie prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia dla danej części w funkcji czasu. Zamiast czasem można posługiwać się inną miarą eksploatacji, np. przebiegiem, ilością przepracowanych. Na tej podstawie można podjąć decyzję o tym, kiedy dana część zamienna powinna być dostępna w magazynie, a co za tym idzie, kiedy należy ją zamówić u dostawcy.

#### 4. ZASTOSOWANIE ROZKŁADU WEIBULLA DO WSPOMAGANIA DECYZJI W ZARZĄDZANIU CZĘŚCIAMI ZAMIENNYMI W UTRZYMANIU RUCHU MASZYN

Wykorzystanie rozkładu Weibulla do prognozowania zapotrzebowania na części zamienne dla służb utrzymania ruchu, wymaga estymacji parametrów rozkładu dla każdego typu części dla różnych urządzeń, w których są one stosowane, gdyż charakter pracy urządzenia wpływa na intensywność występowania uszkodzeń. W praktyce wykonanie takiej analizy jest wskazane jedynie dla maszyn krytycznych w danym przedsiębiorstwie i tylko dla części i zespołów należących do grupy części specjalnych, wolno-rotujących, o dużej wartości. To właśnie ta grupa części sprawia największe trudności decyzyjne.

Estymacji parametrów rozkładu można dokonać na podstawie zarejestrowanych czasów poprawnej pracy części. Informacje te można czerpać z bazy zdarzeń eksploatacyjnych, prowadzonej przez dział utrzymania ruchu.

Poniżej, w tabeli 1 przedstawiono dane dotyczące przebiegów do uszkodzenia łożysk stożkowych CBK-088 stosowanych w piastach kół przednich samochodu Polonez [6].

Tabela 1. Zanotowane przez serwis przebiegi do uszkodzenia łożysk CBK-088

|               |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Numer łożyska | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| Przebieg [km] | 3450 | 4328 | 4980 | 6976 | 7036 | 7039 | 9233 | 9550 |

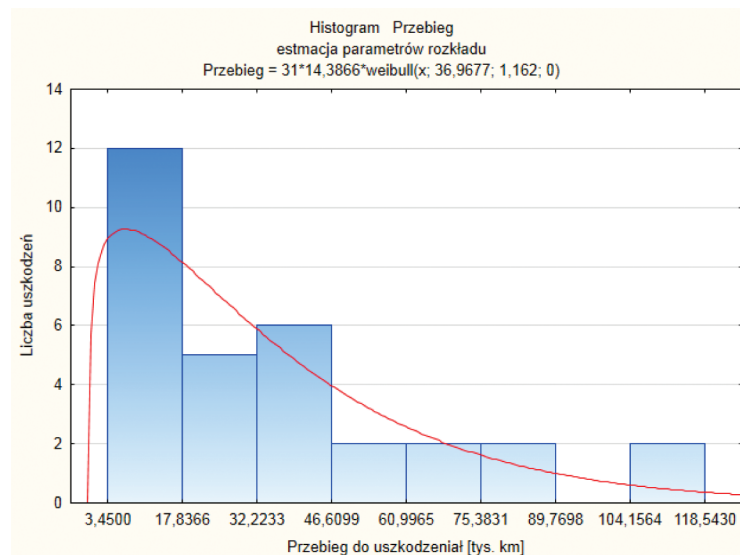
|               |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Numer łożyska | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| Przebieg [km] | 10750 | 11200 | 13123 | 13888 | 20209 | 21090 | 21214 | 26589 |

|               |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Numer łożyska | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
| Przebieg [km] | 30328 | 34000 | 36216 | 36855 | 41870 | 43000 | 43230 | 49000 |

|               |       |       |       |       |       |        |        |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Numer łożyska | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30     | 31     |
| Przebieg [km] | 59346 | 64000 | 71306 | 75400 | 79758 | 111223 | 118543 |

*Dane pochodzą z pracy: Libera M., Waligóra W.: Estymacja początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych w pojazdach samochodowych na podstawie badań eksploatacyjnych.*

Parametry rozkładu Weibulla estymowano z wykorzystaniem pakietu Statistica. Sporządzony histogram ilości uszkodzeń przedstawiono na rys. 1.



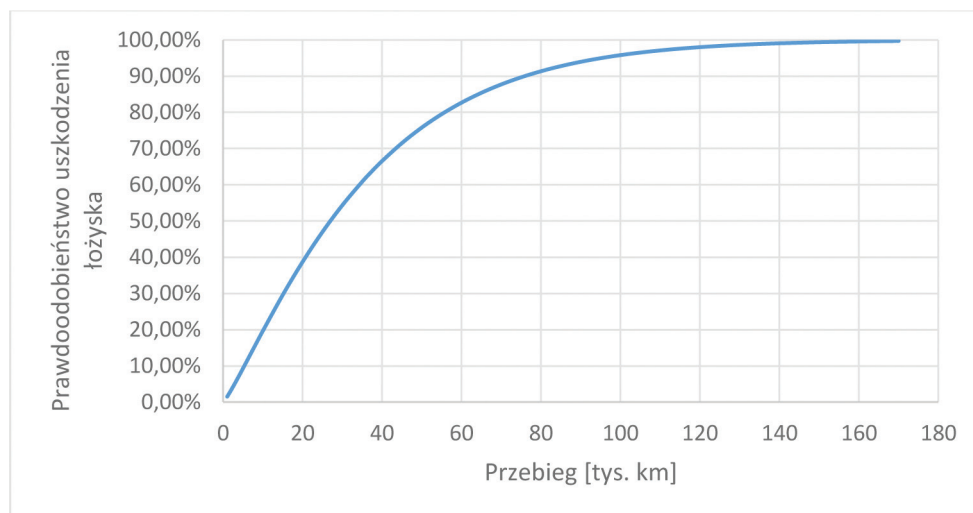
Rys. 1. Histogram ilości uszkodzeń w poszczególnych przedziałach przebiegu

Wartości estymowanych parametrów rozkładu Weibulla wynoszą:

- parametr kształtu –  $a = 1,162$ ;
- parametr skali –  $b = 36968$ .

Wartość parametru kształtu wskazuje na zmęczenie, jako przyczynę uszkodzeń, natomiast parametr skali wskazuje, że 62,3% łożysk uszkodzi się po przebiegu ok. 37000km.

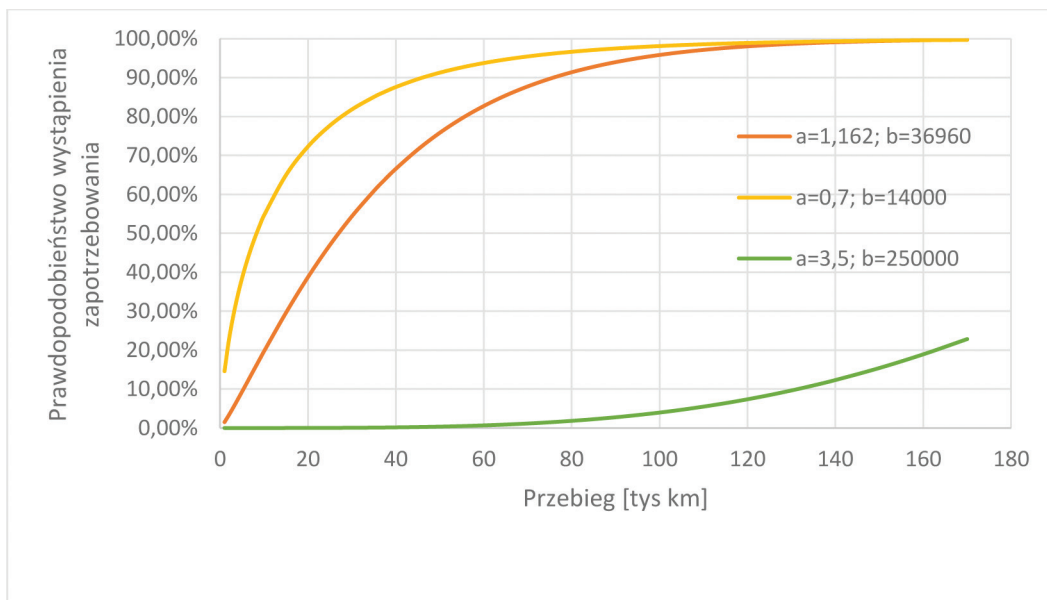
Na podstawie wyznaczonych parametrów rozkładu można określić prawdopodobieństwo uszkodzenia łożyska w funkcji przebiegu pojazdu (rys. 2).



Rys. 2. Prawdopodobieństwo uszkodzenia łożyska w funkcji przebiegu pojazdu

Zaistnienie uszkodzenia jest tożsame z wystąpieniem zapotrzebowania na część zamienną, zatem prawdopodobieństwo uszkodzenia można interpretować jako prawdopodobieństwo wystąpienia zapotrzebowania.

Wartość parametrów rozkładu Weibulla należy wyznaczać dla części eksploatowanych w konkretnych warunkach, gdyż mają one wpływ na częstość występowania uszkodzeń. Poniżej przedstawiono wpływ parametrów rozkładu na wartość prawdopodobieństwa wystąpienia zapotrzebowania (rys. 3).



Rys. 3. Wartość prawdopodobieństwa wystąpienia zapotrzebowania na część zamienną dla różnych wartości parametrów rozkładu Weibulla

Oszacowania parametrów rozkładu dokonano dla takich samych łożysk stosowanych w eksploatowanych pojazdach w różnych warunkach eksploatacji. Z powyższego wykresu wynika, że dla przebiegu 40000km, w przypadku jednego pojazdu, prawdopodobieństwo uszkodzenia łożyska wynosi ok. 87%, dla drugiego ok. 66%, a dla trzeciego jest bliskie 0%. Zatem w przypadku pojazdu trzeciego nie ma konieczności posiadania w zapasie łożyska niezbędnego do wykonania naprawy, co jest konieczne w przypadkach pierwszym i drugim.

Zależnie od uzyskanych wyników można podejmować decyzję dotyczące zamawiania części zamiennych przyjmując, jako podstawę decyzji, dopuszczalne ryzyko wystąpienia zapotrzebowania przy braku części w magazynie. Zamówienie powinno być złożone z takim wyprzedzeniem, aby jego realizacja zbiegła się w czasie z określonym poziomem prawdopodobieństwa wystąpienia zapotrzebowania.

## 5. PODSUMOWANIE

Podsumowując przeprowadzone rozważania należy stwierdzić, że zastosowanie rozkładu Weibulla do wspomagania decyzji w zarządzaniu zapasami części zamiennych dla potrzeb służb utrzymania ruchu pozwala na prognozowanie zapotrzebowania na części zamienne.

Wymaga jednak podjęcia następujących działań:

- przeprowadzenia analizy krytyczności maszyn, zespołów i części;
- przeprowadzenia kategoryzacji krytycznych części zamiennych na grupy: części specjalnych, standardowych i materiałów eksploatacyjnych;
- śledzenia i rejestrowania zdarzeń eksploatacyjnych dotyczących maszyn krytycznych i części krytycznych;
- oszacowania parametrów rozkładu dla wybranych maszyn i części zamiennych;
- określenia dopuszczalnego akceptowalnego poziomu ryzyka wystąpienia zapotrzebowania na poszczególne części zamienne.

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono problemy decyzyjne związane z zamawianiem i gospodarowaniem części zamiennych. Problemy te dotyczą zwłaszcza części zamiennych wolnorotujących, o dużej wartości, będących jednocześnie częściami zamiennymi do maszyn krytycznych w procesie produkcyjnym. Zamawianie tych części sprawia problemy dotyczące terminu zamawiania. W artykule zaproponowano rozwiązanie oparte o badania niezawodności. Główną przesłanką do podjęcia decyzji jest oszacowanie prawdopodobieństwa poprawnej pracy części do wystąpienia uszkodzenia.

**Decision support in spare parts management for machinery maintenance services needs****Abstract**

The paper presents the decision-making problems related to ordering and management of spare parts. These problems especially concern slow moving, high retail value parts, which are also spare parts for the critical equipment in the production process. Ordering of these parts causes problems concerning the date of order. The paper suggests a solution based on the reliability testing. The main reason for the decision making is to estimate the probability of a correct operation of parts to a failure occurrence.

**6. LITERATURA**

- [1] Abernethy R.B.: The New Weibull Handbook. Fourth Edition. 2000.
- [2] Blaik P.: Logistyka. Koncepcja zintegrowanego zarządzania., Wyd. II, PWE, Warszawa 2001.
- [3] Jasiulewicz-Kaczmarek M., Drożyner P.: Maintenance Management Initiatives towards Achieving Sustainable Development, In: Golinska P. et al. (eds.): Information Technologies in Environmental Engineering Environmental Science and Engineering, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, pp. 707-721, 2011
- [4] Krawczyk S.: Zarządzanie procesami logistycznymi. PWE, Warszawa, 2001.
- [5] Krawczyk S.: Podstawy zarządzania zapasami w przykładach. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2002.
- [6] Libera M., Waligóra W.: Estymacja początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych w pojazdach samochodowych na podstawie badań eksploatacyjnych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. Zeszyt 2 (150) 2007.
- [7] Ligier K.: Logistic in maintenance, in Operation and logistics management. University of Technology Poznan. 2010.
- [8] Skowronek CZ., Sarjusz-Wolski Z.: Logistyka w przedsiębiorstwie. Wyd. II, PWE Warszawa 1999.
- [9] Szymonik A.: Logistyka w bezpieczeństwie. Wyd. II., Diffin, Warszawa, 2011.
- [10] Utrzymanie pojazdów i maszyn. red. R. Michalski, S. Niziński. ITE Radom 2007.
- [11] Bułka W.: Zarządzanie i optymalizacja zapasów części zamiennych. [http://e-bmp.pl/File/bmp\\_5149accda4bc7.pdf](http://e-bmp.pl/File/bmp_5149accda4bc7.pdf)
- [12] Zubalewicz D.: Magazyn części zamiennych. <http://www.apbiznes.pl/wp-content/uploads/2011/06/Daniel-Zubalewicz-CEDC-.pdf>