

## **Sylwia Werbińska-Wojciechowska**

Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn  
Politechnika Wroclawska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, Polska  
E-mail: sylwia.werbinska@pwr.wroc.pl

### **Problem rezerwowania czasowego w modelowaniu niezawodności systemów logistycznych**

**Słowa Kluczowe:** koncepcja opóźnień czasowych, niezawodność, system logistyczny

**Abstrakt:** W artykule przedstawiono zagadnienia związane z matematycznym modelowaniem utrzymania systemów technicznych w stanie zdatności z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych (DT). Przedstawiono przegląd literatury z badanego obszaru obejmujący okres 1984-2012. Następnie został omówiony problem relacji czasowych w systemach logistycznych. W ostatnim punkcie, został przedstawiony przykład zastosowania modelu DT do oceny niezawodności szesnastu wózków widłowych funkcjonujących w wybranym systemie.

#### **1. Wprowadzenie**

W każdym systemie logistycznym, funkcjonującym w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, należy uwzględnić zawodność jego elementów wykonawczych, która może doprowadzić do braku możliwości realizacji zadania wspierającego i w efekcie może przełożyć się na obniżenie gotowości systemu wspieranego. W dostępnej teorii niezawodności można znaleźć prace, dotyczące zagadnienia modelowania i oceny niezawodności systemów logistycznych, projektowanych dla wsparcia obiektów/systemów technicznych [61]. Opracowane modele ograniczone są jednak przede wszystkim do analizy procesu zaopatrzenia systemu technicznego w niezbędne części wymienne (np. [12, 21]) przy uwzględnieniu problemu zapewnienia niezbędnej liczby stanowisk obsługi/ekip remontowych (np. [1, 7, 26, 47, 56, 57]) nie badając wpływu funkcjonowania innych elementów logistycznych na poziom niezawodności systemu wspieranego. Jednocześnie, przeprowadzane analizy niezawodnościowe przy pomocy znanych modeli są niepełne z powodu braku oceny wpływu relacji występujących pomiędzy tej klasy systemami na ogólną niezawodność realizowanych funkcji i zadań.

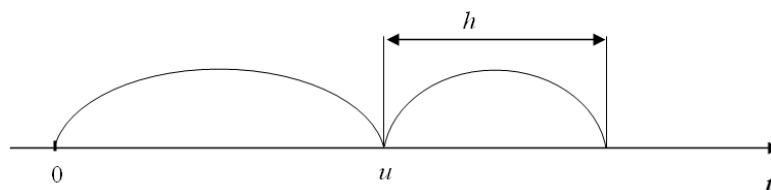
W artykule skupiono się na przedstawieniu zagadnienia modelowania niezawodności systemu logistycznego z wykorzystaniem analizy opóźnień czasowych (Delay Time Analysis – DTA). W tym celu przedstawiono przegląd literatury badanego zagadnienia, jak również scharakteryzowano relacje czasowe w procesie funkcjonowania systemów logistycznych. W drugiej części artykułu skupiono się na analizie przedsiębiorstwa, zajmującego się m.in. remontami i serwisem wózków jezdniowych, wraz z zastosowaniem podstawowego modelu kontroli stanu systemu z wykorzystaniem DTA do oceny niezawodności pracujących obiektów.

## 2. Problem modelowania relacji czasowych w procesie funkcjonowania systemów technicznych

W przypadku złożonych systemów, w których istotny staje się problem modelowania relacji pomiędzy dwoma odrębnymi podsystemami, które mają wpływ na ogólną gotowość systemu, wiele prac zwraca uwagę na zagadnienie opóźnień czasowych w realizacji procesów operacyjnych.

Problem opóźnień czasowych charakteryzuje wiele fizycznych czy technicznych systemów i poruszany jest m.in. w biologii, mechanice czy ekonomii [29]. W latach 70. XX w. koncepcja opóźnień czasowych *Delay Operator* była wykorzystywana w analizach czasowych w procesie modelowania czy prognozowania [9]. W kolejnych latach pojawiały się prace poświęcone zagadnieniu zależności czasowych w innych obszarach badawczych, m.in. w modelowaniu procesów logistycznych oraz procesów obsługiwanie obiektów technicznych. Przegląd podstawowych problemów badawczych związanych z modelowaniem relacji czasowych systemów operacyjnych przedstawiono w pracy [59].

W 1976r. Christer (za [18]) zaproponował koncepcję opóźnień czasowych *Delay-time Concept* (DTC), wykorzystywaną do dnia dzisiejszego w teorii procesów odnowy, w celu optymalizacji czasu niezdatności systemu technicznego spowodowanego nie wykrytym w porę jego uszkodzeniem (optymalizacja okresu pomiędzy kolejnymi przeglądami). W koncepcji tej okres czasu od chwili  $u$ , w której pojawiają się pierwsze wykrywalne w trakcie przeglądu okresowego sygnały o pojawiającym się uszkodzeniu, do chwili uszkodzenia się systemu nazywany jest opóźnieniem czasowym i oznaczany przez  $h$  (rys. 1.).



Rys. 1. Koncepcja relacji czasowych [18]

Do chwili obecnej opublikowano także szereg artykułów zajmujących się wdrażaniem koncepcji DT w obszarze funkcjonowania systemów rzeczywistych, m.in. do rozwiązywania problemów obsługiwanie maszyn produkcyjnych (np. [2, 19, 36]). Znane literaturze modele bazują na klasycznych strategiach obsługi profilaktycznej (np. [43, 53, 63]) oraz strategii ciągłej kontroli stanu systemu (*condition-based maintenance*) (np. [20, 40, 41, 55]). Inne zastosowania dotyczą m.in. obszaru budownictwa (np. [16]), transportu (np. [24, 37]).

Problem modelowania procesów obsługiwanie obiektów technicznych z uwzględnieniem niepełnej diagnozy stanu systemu (ang. *imperfect inspection*) jest analizowany m.in. w pracach [3, 13, 15, 22, 34, 35, 44, 46, 52].

Podstawowe pytania, na które szukano odpowiedzi dotyczyły [15]:

- Jak często pojazdy powinny być naprawiane, przeglądane okresowo?
- Czy struktura systemu technicznego jest bezpieczna?
- Jak często dokonywać przeglądów okresowych urządzeń linii produkcyjnej?
- Jaka jest korzyść z realizacji procesów obsługiwanie w odniesieniu do czasu niezdatności systemu oraz kosztów operacyjnych?

Przegląd istniejących modeli DT można znaleźć m.in. w [3, 4, 13, 14, 15, 17, 20, 35, 39, 44, 52], czy w pracach [31, 32, 33, 39], gdzie skupiono się na możliwościach stosowania modeli DT w systemach wieloelementowych. W pracy [30] przedstawiono przegląd literatury

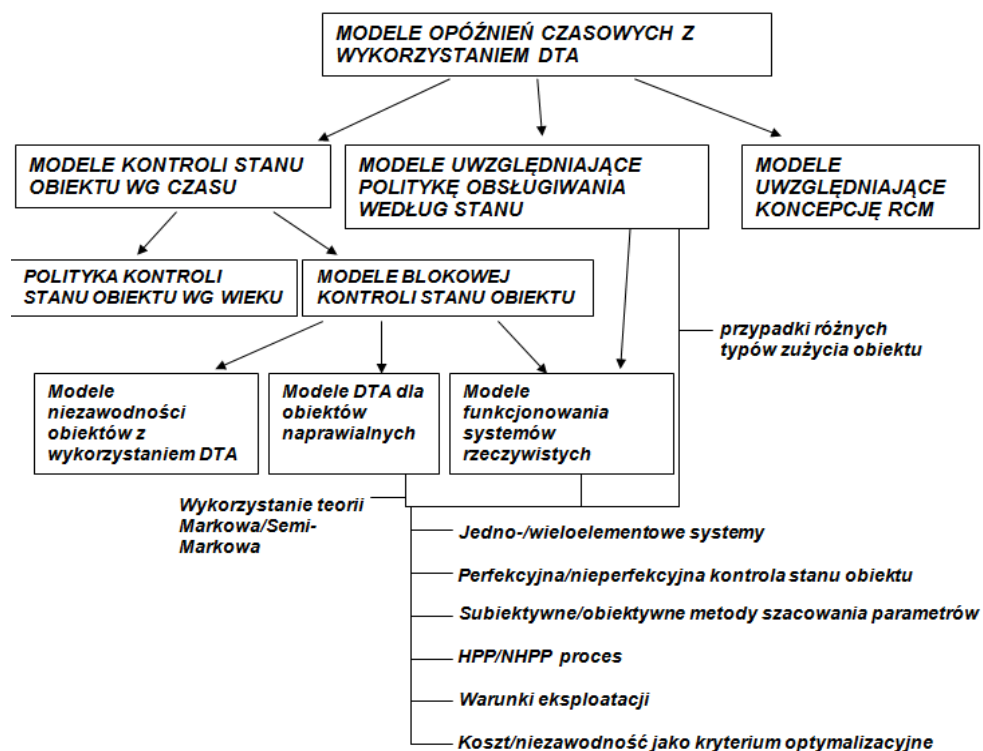
z obszaru modelowania procesów obsługiwanego jednoelementowych obiektów technicznych z opóźnieniem czasowym.

Przegląd literatury z obszaru modelowania strategii utrzymania w stanie zdolności obiektów technicznych, gdzie modele DT są analizowane wspólnie m.in. ze strategiami obsługiwanego profilaktycznego można znaleźć w [23, 27, 28, 38, 42, 48, 50].

Jedną z pierwszych publikacji przedstawiających problematykę modelowania opóźnień czasowych była praca [17]. Następnie, autorzy pracy [4] przeanalizowali rozwój analizy opóźnień czasowych, jako narzędzia modelowania zagadnień inżynierskich problematyki eksploatacji. W pracy [15], przedstawiono przegląd literatury z obszaru modelowania relacji czasowych obejmującej okres lat 80. i 90. XX w. Autor przedstawia w tej pracy podstawowy model opóźnień czasowych wraz z prezentacją możliwych kierunków jego rozwoju, uwzględniając m.in. zagadnienie przeprowadzania perfekcyjnego/nieperfekcyjnego przeglądu okresowego, stacjonarnych/niestacjonarnych warunków eksploatacji, czy typu procesu estymacji parametrów modelu.

Na rysunku 2 przedstawiono trzy podstawowe grupy modeli opóźnień czasowych, zgodnie z typem zastosowanej strategii obsługiwanego. Pierwsza grupa obejmuje modele kontroli stanu obiektu wg czasu (*Time-based Inspection Models*). W literaturze można znaleźć wiele prac dotyczących polityki wymiany blokowej (*Block-Replacement Inspection Policy*), gdzie kontrola stanu obiektu jest przeprowadzana co  $T$  jednostek czasu.

Druga grupa modeli odnosi się do prac, które uwzględniają politykę obsługiwanego według stanu *CM* (*Condition-based Maintenance models*). Natomiast ostatnia grupa modeli odnosi się do zagadnień koncepcji *RCM* (*Reliability Centered Maintenance*).



Rys. 2. Klasyfikacja modeli opóźnień czasowych [39]

Jednocześnie, badając problematykę relacji czasowych, należy uwzględnić zagadnienie opóźnień logistycznych występujących w procesie funkcjonowania wojskowych systemów technicznych [45]. Podstawowy problem w tym obszarze polega na ocenie, jak opóźnienie logistyczne wpływa na czas niezdatności systemu wojskowego (opóźnienie czasu

naprawy przede wszystkim z powodu braku elementów wymiennych), a tym samym na jego podstawowe charakterystyki niezawodnościowe [60].

Podjęcie wojskowe zostało także zaimplementowane do rozwiązywania problemów czasu pracy systemów produkcyjnych i technicznych, dotyczących m.in. [60]:

- opóźnień międzyoperacyjnych,
- losowego czasu dostawy,
- dostępności zapasów.

Przykładem może być opracowany model nadsystemu z rezerwą czasową przedstawiony w pracy [60], uwzględniający możliwość wystąpienia niezdatności systemu logistycznego w procesie eksploatacji systemu wspieranego i pozwalający na ocenę wpływu zawodności systemu wspierającego na ogólne charakterystyki niezawodnościowe i ekonomiczne badanego nadsystemu.

## 2.1. Podstawowy model przeglądu okresowego z wykorzystaniem DTA

Jednym z podstawowych modeli przeglądu okresowego, bazujących na zastosowaniu koncepcji DTA (Delay Time Analysis) jest model kontroli okresowej stanu obiektu przedstawiony w pracy [18]. Podstawowe założenia omawianego modelu przyjmują, że:

- a) operacje kontroli stanu obiektu (*inspections*) odbywają się co ustalony czas  $T$  i trwają  $d$  jednostek czasu;
- b) koszt operacji kontroli stanu obiektu wynosi  $I$  jednostek;
- c) operacje kontroli stanu obiektu są perfekcyjne, co oznacza, że wszystkie defekty możliwe do wykrycia w trakcie kontroli są identyfikowane;
- d) operacje kontroli stanu obiektu są przeprowadzane niezależnie od siebie;
- e) uszkodzenia są niezależne i pojawiają się w systemie ze stałą intensywnością  $k$ ;
- f) wszystkie defekty, wykryte w trakcie operacji kontroli stanu obiektu są usuwane w czasie trwania procesu kontroli;
- g) uszkodzenia systemu trwają niedługi okres czasu  $d_b$ , w porównaniu do okresów  $T$  i  $d$ ;
- h) opóźnienie czasowe  $h$  uszkodzenia jest niezależnie od intensywności uszkodzeń oraz posiada znaną postać funkcji  $f_h(h)$  i  $F_h(h)$ .

Przy tak zdefiniowanych założeniach możliwe jest wyznaczenie funkcji prawdopodobieństwa pojawienia się uszkodzenia systemu  $P_b(T)$  [18]:

$$P_b(T) = \frac{1}{T} \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \quad (1)$$

Oczekiwany czas niezdatności, definiowany funkcją  $E_d(T)$ , można opisać następująco [18]:

$$E_d(T) = \frac{kTd_b P_b(T) + d}{T + d} \quad (2)$$

Jednocześnie, przyjmując wartości oczekiwane kosztów naprawy  $c_b$  oraz operacji kontroli stanu obiektu  $c_i$ , oczekiwany koszt utrzymania obiektu w okresie  $T$  można opisać funkcją  $C(T)$  o postaci [18]:

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)} \{kT[c_b P_b(T) + c_i(1 - P_b(T))] + 1\} \quad (3)$$

Rozpatrzmy drugi przypadek, w którym założenie o niezawodnej operacji kontroli stanu obiektu przestaje obowiązywać. W takim przypadku, należy wprowadzić dodatkowe

prawdopodobieństwo  $\beta$ , że defekt obiektu zostanie zidentyfikowany podczas przeprowadzania  $n$ -tej operacji kontroli stanu obiektu, oraz prawdopodobieństwo  $(1 - \beta)$ , że defekt nie zostanie wykryty. Przy takim założeniu, funkcja  $P_b(T)$  przyjmuje postać [18]:

$$P_b(T) = 1 - \left\{ \int_{y=0}^T \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta}{T[(1 - \beta)^{n-1} R(nT - y)]} dy \right\} \quad (4)$$

Obecnie w literaturze istnieje wiele prac wykorzystujących opisany model do analizy funkcjonowania rzeczywistych systemów technicznych, czy proponujących rozwinięcie teorii DTA. Jedną z grup modeli – modele niezawodności z wykorzystaniem DTA, została przedstawiona w pracy [39].

### 3. Relacje czasowe w procesie funkcjonowania systemów logistycznych

W chwili obecnej, w dobie postępującej konkurencji pojawił się problem pełnej integracji systemów współpracujących w łańcuchach logistycznych i eliminacji wszelkich opóźnień czasowych wpływających na wartość dodaną produktu [8]. Traktując zakłócenia pojawiające się w procesie funkcjonowania łańcucha dostaw jako wystąpienie zdarzenia niepożądanego, można przyjąć, iż określają one tzw. obszar niepewności łańcucha dostaw. Niepewność ta może być definiowana z perspektywy [51]:

- czasu (w sensie czasu trwania określonego działania/procesu, chwili rozpoczęcia/zakończenia realizacji czynności, częstości występowania zdarzenia/popytu);
- ilości (zaopatrzenie, popyt, przepływy materiałowe);
- lokalizacji (miejsce rozpoczęcia/zakończenia zdarzenia);
- jakości (usługi/produktu);
- kosztu (krotność występowania).

Jednocześnie nie każde wystąpienie zdarzenia niepożądanego od razu spowoduje wystąpienie niezdatności systemu. Krytycznym kryterium determinującym przejście systemu w stan niezdatności jest czas. Jeżeli pojawi się błąd np. w postaci błędnej ilości produktów wysłanych do klienta, błędnej lokalizacji czy złej jakości produktów – gdy czas pozwoli na usunięcie tego zdarzenia – system nie zostanie uznany za uszkodzony. W związku z tym, można mówić o tzw. rezerwie czasowej na realizację zadań operacyjnych.

Pojęcie nadmiaru czasowego w eksploatacji należy rozumieć jako rezerwę czasu wpływającego od chwili powstania uszkodzenia elementu do chwili uszkodzenia się systemu technicznego [58]. *Rezerwowanie czasowe polega na uwzględnieniu dodatkowego czasu na wykonanie zadania (w stosunku do czasu niezbędnego na jego realizację), który może być wykorzystany do odtworzenia stanu zdatności systemu lub polepszenia jego charakterystyk technicznych* [49, 58]. Oznacza to, iż systemy z rezerwą czasową odznaczają się własnością polegającą na tolerowaniu awarii o krótkim (zwykle określonym) czasie trwania.

W literaturze dostępnych jest wiele prac obejmujących problematykę rezerwowania czasowego, np. [10, 11, 49, 58]. Jednocześnie, w zależności od [49, 58]:

- typu/rodzaju tolerancji awarii,
- sposobu wykorzystania rezerwy czasowej,
- sposobu uzupełniania rezerwy czasowej,

można wyróżnić podstawowe rodzaje rezerwy czasowej, omówione m.in. w pracy [62].

Dobór odpowiedniego rodzaju rezerwy czasowej zależy od typu modelowanego systemu, rodzaju zadania operacyjnego, definicji typu wydajności, jaki jest istotny w systemie (np. czy interesująca jest wydajność systemu w pewnym horyzoncie czasowym), oraz zachowania się systemu w chwili uszkodzenia (czy pojedyncze uszkodzenie powinno wpływać na niezawodność systemu). Podstawowa klasyfikacja modeli systemów z rezerwą

czasową wraz z niezbędnymi informacjami, uwzględniająca wymienione cechy, została przedstawiona w pracy [62].

#### **4. Przykład możliwości zastosowania modelu DTA**

W celu oceny możliwości zastosowania modeli DTA w praktyce, poddano analizie przedsiębiorstwo zajmujące się m.in. remontami i serwisem wózków jezdniowych [25]. Firma specjalizuje się w serwisowaniu i przeprowadzaniu kompleksowych remontów wózków podnośnikowych z napędem silnikowym, z silnikami wysokoprężnymi, gazowymi i elektrycznymi. Przygotowuje ich dokumentację do odbioru przez UDT i sprawuje stały nadzór konserwatorski nad wózkami podlegającymi dozorowi technicznemu. Świadczy usługi zarówno klientom indywidualnym jak również przedsiębiorstwom. Jest to pełny zakres technicznych środków transportu wewnętrznego oraz zaopatrzenie w części zamienne i ogumienie.

Dane niezbędne do przeprowadzenia analizy niezawodności obejmują dane serwisowe szesnastu elektrycznych wózków widłowych wybranej marki, obejmujące okres eksploatacji od roku 2000 do końca 2008. Zawierają dokładny przebieg pracy wózków, czasy trwania remontów i przeglądów, wyszczególnienie wymienianych elementów oraz wszelkich usterek, które wystąpiły w tym czasie.

Wózek o najkrótszym przebiegu ma jedynie 2800 motogodzin, o najdłuższym aż 13300 motogodzin.

##### **4.1. Zadania obsługowe zrealizowane w badanym okresie czasu**

W pierwszym kroku zebrano informacje o wszystkich zadaniach obsługowych (wymiana zespołów, części oraz przebyte naprawy), jakie zostały zanotowane w analizowanym okresie czasu. W celu uporządkowania zgromadzonych danych w konstrukcji wózka wyróżniono 7 głównych podgrup: rama i karoseria wózka, instalacja i wyposażenie elektryczne, układ hydrauliczny, układ podnoszenia, układ napędowy, układ kierowniczy, oraz układ hamulcowy. W Tabeli 1 przedstawiono zadania obsługowe zanotowane dla układu podnoszenia.

Operacje kontroli stanu obiektu (diagnoza stanu obiektu) dokonywane są w terminach i zakresie określonym w dokumentacji techniczno-ruchowej. Podczas przeglądu sprawdzano mechanizmy napędowe i wszystkie układy, a w szczególności:

- działanie urządzeń zabezpieczających;
- stan cięgien nośnych i ich zamocowanie;
- stan urządzeń chwytających;
- działanie urządzeń napędowych, sterujących, sygnalizacyjnych i oświetleniowych;
- prawidłowość obsługi urządzenia;
- co 12 miesięcy sprawdzenie stanu konstrukcji nośnej, skupiając się na połączeniach nitowanych oraz spawanych.

Prace konserwacyjne przeprowadza się na podstawie odczytu licznika motogodzin. Planowe prace konserwacyjne wykonuje się m.in. co 1000 motogodzin (np. konserwacja osi napędowej, konserwacja masztu, kontrola zębów wideł), co 2000 motogodzin (konserwacja układu podnoszenia), czy co 3000 motogodzin (konserwacja osi napędowej, konserwacja instalacji hydraulicznej).

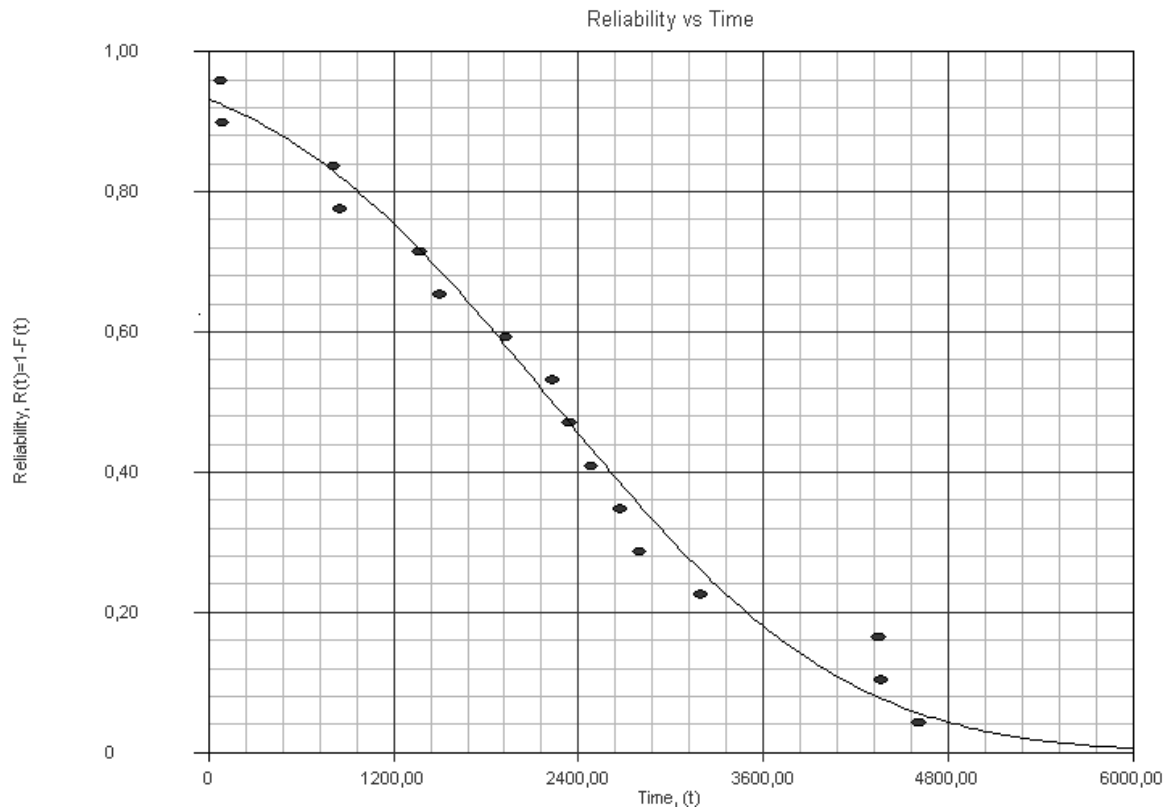
Tabela 1. Wykaz realizowanych zadań obsługowych dla układu podnoszenia [25]

Operacja	Przedmiot operacji	Ilość	Operacja	Przedmiot operacji	Ilość
wymiana	Rolka karetki (płyty)	22	naprawa	Siłownik odchyłu	21
	Łożysko podpory masztu	18		Zerwany łańcuch	17
	Łańcuch	18		Prostowanie karetki (płyty)	14
	Zabezpieczenie wideł (blokada)	14		Siłownik podnoszenia (uszczelnianie)	13
	Zabezpieczenie łańcucha	14		Maszt (spawanie, szlifowanie)	10
	Widły	12		Regulacja łańcucha (naciąganie)	8
	Rolka masztu	8		Regulacja podnoszenia i przechyłu	8
	Sworznie siłownika odchyłu	4		Osłona rolek łańcucha	4
	Śruba naciągowa	3		Kostki zabezpieczające widły	4
	Śruba mocowania masztu	2		Prostowanie wideł	2
	Siłownik odchyłu	2			
	Siłownik podnoszenia	1			

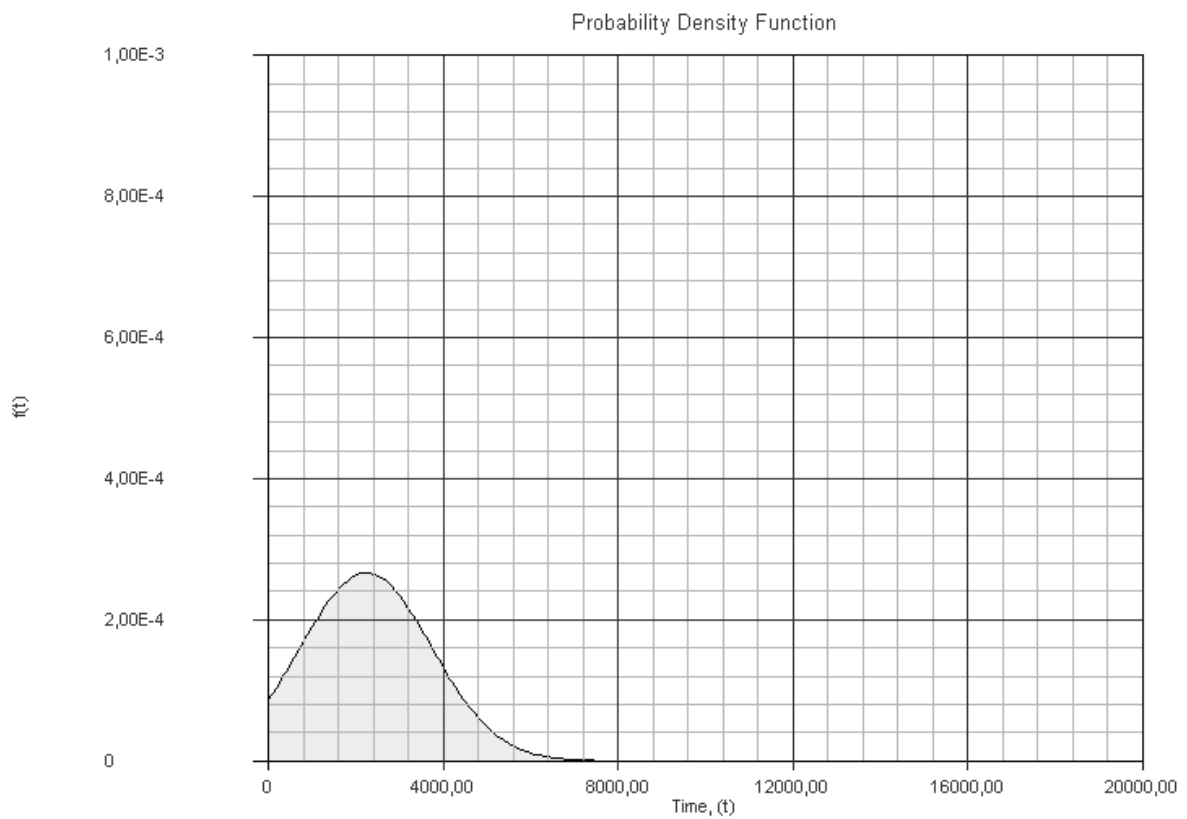
#### 4.2. Podstawowe charakterystyki niezawodnościowe obiektów

Elektryczny wózek widłowy jest obiektem naprawialnym, tj. obiektem który podlega operacji naprawy po uszkodzeniu<sup>1</sup>. Analiza poziomu niezawodności badanego obiektu została przeprowadzona w oparciu o badania karty serwisowej, zawierającej informacje o przebiegach, wykazie remontów i przeglądów oraz czasach napraw. W wyniku badań 16-tu wózków uzyskano m.in. realizacje czasu zdatności do pierwszego uszkodzenia. Możliwe było także wyznaczenie m.in. funkcji niezawodności  $R(t)$ , dystrybuanty  $F(t)$ , czy gęstości prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia wózka  $f(t)$ . Przy analizie danych wspomagano się programem Weibull++ v. 6 (firmy ReliaSoft Co. USA), dzięki któremu m.in. dobrano rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej czasu poprawnej pracy. Jest nim rozkład normalny, który należy do najczęściej spotykanych w praktyce. Na rys. 3-4 przedstawiono przykładowe charakterystyki niezawodności badanych wózków widłowych.

<sup>1</sup> Zgodnie z definicją podaną w Słowniku eksploatacyjnym PNTTE, <http://www.eksploatacja.waw.pl/index.php?s=4000>



Rys. 3. Przebieg funkcji niezawodności do pierwszego uszkodzenia  $R_1(t)$



Rys. 4. Funkcja  $f(t)$  gęstości rozkładu prawdopodobieństwa badanej zmiennej



#### 4.3. Możliwość zastosowania podstawowego modelu kontroli stanu obiektu z wykorzystaniem DTA

W celu wykorzystania podstawowego modelu kontroli stanu obiektu z wykorzystaniem DTA, opisanego w punkcie 2.1., niezbędne jest oszacowanie kilku parametrów:

- czas trwania operacji kontroli stanu systemu  $d$  oszacowano na 2 h;
- czas niezbędny na usunięcie uszkodzenia  $d_b$  wyniósł 5,18 h (średni czas wszystkich napraw, zanotowanych wśród szesnastu wózków);
- całkowity czas operacyjny w badanym okresie wyniósł (dla 16 wózków) 131700 motogodzin;
- stałą intensywność  $k$  pojawiania się uszkodzeń w systemie określono na poziomie  $k = 0,006363$  na motogodzinę (838 uszkodzeń zanotowanych pośród 16 wózków);
- MTBF na poziomie 157 motogodzin, przy odchyleniu standardowym równym 381 motogodzin.

Wykorzystując wyznaczone parametry, oraz podstawiając do wzoru (2) funkcję (1), oczekiwany czas niezdatności  $E_d(T)$ , można opisać następująco:

$$E_d(T) = \frac{kT \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \right] d_b + d}{T + d} \quad (5)$$

po czym otrzymuje się funkcję:

$$E_d(T) = \frac{(0,006363T) \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \right] 5,18 + 2}{T + 2} \quad (6)$$

W analizowanym modelu należy także określić opóźnienie czasowe  $h$  uszkodzenia, które jest w założeniu niezależnie od intensywności uszkodzeń oraz posiada znaną postać funkcji  $f_h(h)$  i  $F_h(h)$ .

Funkcje rozkładu prawdopodobieństwa opóźnienia czasowego  $h$  można wyznaczyć przy zastosowaniu jednej z dwóch metod wykorzystując dane subiektywne (*subjective data*) lub dane obiektywne (*objective data*). Więcej informacji na ten temat można znaleźć m.in. w pracach [5, 6, 54]. Wykorzystanie danych obiektywnych wymaga posiadania znacznej ilości informacji w porównaniu do badań ankietowych (dane subiektywne). Jednocześnie, powinno pozwolić na zdefiniowanie procesu funkcjonowania analizowanego systemu w wybranym okresie czasu.

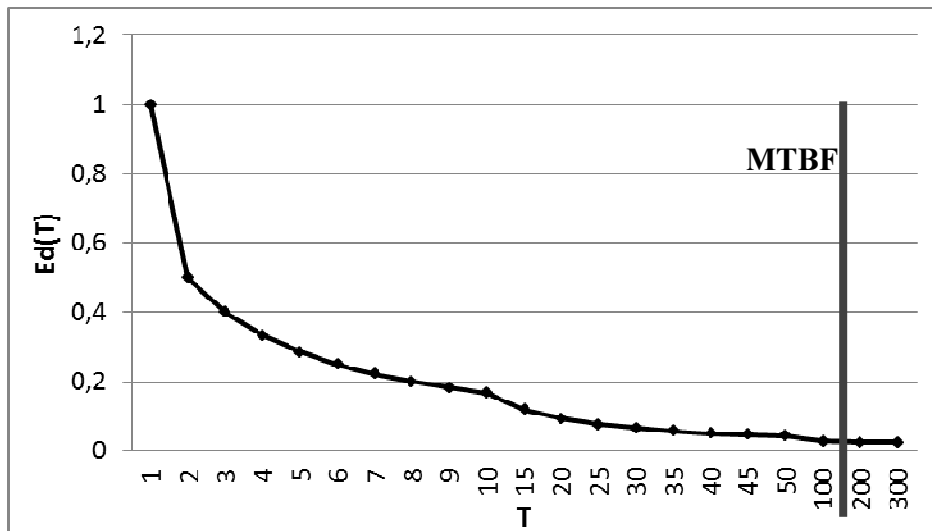
W przypadku funkcjonowania analizowanych obiektów technicznych, nie ma danych historycznych o chwilach  $u$  wystąpienia pierwszych symptomów przyszłego uszkodzenia. W związku z tym brakuje wiarygodnej informacji, jakim rozkładem prawdopodobieństwa należy zamodelować parametr opóźnienia czasowego, aby otrzymać najlepsze wyniki. W rezultacie, pozostaje jedynie rozpatrzyć przypadki, kiedy zmienna losowa  $h$  jest opisana różnymi rozkładami prawdopodobieństwa. W artykule skupiono się na przypadku, w którym parametr opóźnienia czasowego jest opisany rozkładem wykładniczym, a funkcja gęstości prawdopodobieństwa przyjmuje postać:

$$f_h(h) = ke^{-kh} \quad (7)$$

Podstawiając formułę (7) do równania (6) otrzymujemy:

$$E_d(T) = \frac{(0,006363T) \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (T-h) k e^{-kh} dh \right] 5,18 + 2}{T + 2} \quad (8)$$

Uwzględniając w równaniu (8) średnią intensywność uszkodzeń  $k$  (w analizowanym przypadku  $k = 0,006363$ ), otrzymano wykres przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Funkcja  $E_d(T)$  w sytuacji gdy parametr opóźnienia czasowego jest opisany rozkładem wykładniczym

Zgodnie z przedstawionym wykresem (rys. 5), wyraźnie można zauważyć, iż funkcja oczekiwanego czasu niezdatności stabilizuje się w okolicy oszacowanej wartości MTBF. Jednocześnie pojawia się pytanie, które parametry i w jaki sposób wpływają na uzyskane wyniki. W tym celu należy przeprowadzić analizę wrażliwości modelu na zmianę jego parametrów, jak również ocenić, jaki wpływ na poziom funkcji  $E_d(T)$  ma charakter rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $h$ . Zagadnienia te będą przedmiotem dalszych prac badawczych.

## 5. Podsumowanie

Wykorzystanie modeli kontroli stanu obiektu z zastosowaniem DTA oraz odpowiedniego systemu obsługi profilaktycznej może służyć minimalizacji czasu niezdatności systemu z powodu nie wykrytych defektów i pojawiających się uszkodzeń. W artykule skupiono się na zastosowaniu jednego z pierwszych modeli DTA w celu analizy funkcjonowania systemu wózków widłowych. Niestety wykorzystany model wiąże się z koniecznością uwzględnienia szeregu założeń upraszczających, które nie zawsze mogą być spełnione w praktyce. Po pierwsze, operacje kontroli stanu obiektu nie zawsze są perfekcyjne, co oznacza, że nie wszystkie defekty możliwe do wykrycia w trakcie kontroli są identyfikowane. Drugie założenie, które zwykle nie jest spełnione w praktyce dotyczy stałej intensywności uszkodzeń  $k$ .

Ostatni i najważniejszy problem dotyczy parametru opóźnienia czasowego  $h$ . Zwykle nie dysponujemy odpowiednimi danymi, które pozwoliłyby na oszacowanie matematyczne funkcji prawdopodobieństwa tej zmiennej losowej. Oznacza to, iż nie ma możliwości jednoznacznego określenia okresu  $T$  między operacjami kontroli stanu systemu. Jednocześnie

oczekuje się, iż połączenie modelowania z wykorzystaniem DTA oraz realizacji zadań obsługi profilaktycznej umożliwi zapewnienie poziomu oczekiwanej liczby niewykrytych defektów na poziomie 5 – 10 % (w zależności od dobranego rozkładu prawdopodobieństwa).

W celu określenia, czy przeanalizowany model DTA jest odpowiedni do oceny poziomu niezawodności analizowanego systemu współpracujących wózków jezdnych, należało by dodatkowo uzupełnić zebrane dane eksploatacyjne, co pozwoliło by na dokładniejsze określenie parametru opóźnienia czasowego oraz jego charakterystyk probabilistycznych.

## References

1. Agrafiotis G. K., Tsoukalas M. Z. Reliability analysis and optimization applications of a two-unit standby redundant system with spare units. *Microelectronics Reliability* 1994; 34(9): 1469-1475.
2. Akbarov A., Christer A. H., Wang W. Problem identification in maintenance modelling: a case study. *International Journal of Production Research* 2008; 46(4): 1031-1046.
3. Alzubaidi, H. J. Maintenance modelling of a major hospital complex. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1993.
4. Baker R. D., Christer A. H. Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance. *European Journal of Operational Research* 1994; 73: 407-422.
5. Baker R. D., Wang W. Developing and testing the delay time model. *Journal of the Operational Research Society* 1993; 44: 361-374.
6. Baker R. D., Wang W. Estimating the delay time distribution of faults in repairable machinery for failure data. *IMA Journal of Mathematical Application in Business and Industry* 1992; 3: 259-282.
7. Barron Y., Frostig E., Levikson B. Analysis of R out of N systems with several repairmen, exponential life times & phase type repair times: An algorithmic approach. *European Journal of Operational Research* 2006; 169: 202-225.
8. Bogataj L., Bogataj M. The study of optimal additional investments in capabilities for reduction of delays in value chain. *International Journal of Production Economics* 2007; 108: 281-290.
9. Box G. E. P., Jenkins G. M. *Time Series Analysis Forecasting and Control*, California: Holden-Day, 1976.
10. Caban D, Maciejewski H. Time redundancy in a transportation logistics system. *Advances in safety and reliability. Proc. of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2005, Tri City, Vol.1/ed. Kołowrocki K., Leigden: A. A. Balkema, 2005: 293-296.*

11. Caban D., Maciejewski H. Niezawodność systemów ze skumulowaną rezerwą czasową. Materiały XXXI Zimowej Szkoły Niezawodności, Radom: Instytut Technologii Eksploatacji, 2004: 74-80.
12. Catuneanu V. M., Moldovan C., Popentin, Fl., Gheorghin M. Optimum system availability and spare allocation. *Microelectronic Reliability* 1988; 28(3): 353-357.
13. Cho I. D., Parlar M. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research* 1991; 51: 1-23.
14. Christer A. H. A Review of Delay Time Analysis for Modelling Plant Maintenance. in: *Stochastic Models in Reliability and Maintenance*, Osaki S. (ed.), Springer, 2002.
15. Christer A. H. Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 1999; 50: 1120-1137.
16. Christer A. H. Modelling inspection policies for building maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 1982; 33: 723-732.
17. Christer A. H., Redmond D. F. A recent mathematical development in maintenance theory. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry* 1990; 2: 97-108.
18. Christer A. H., Waller W. M. Delay time models of industrial inspection maintenance problems. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(3): 401-406.
19. Christer A. H., Wang W., Baker R. D. Sharp J.M. Modelling maintenance practice of production plant using the delay-time concept. *IMA Journal of Mathematics applied in Business and Industry* 1995; 6: 67-83.
20. Christer A. H., Wang W. A model of condition monitoring of a production plant. *International Journal of Production Research* 1992; 30(9): 2199-2211.
21. Coughlin R. J., Optimization for spares in a maintenance scenario. *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium* 1984: 371-376.
22. Das, A. N., Sarmah, S. P. Preventive replacement models: an overview and their application in process industries. *European Journal of Industrial Engineering* 2010; 4(3): 280-307.
23. Dekker, R., Scarf, P. A. On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art. *Reliability Engineering and System Safety* 1998; 60: 111-119.
24. Desa M. I., Christer A. H. Modelling in the absence of data: a case study of fleet maintenance in a developing country. *Journal of the Operational Research Society* 2001; 52: 247-260.
25. Dziurkowski P. Pomiar niezawodności elektrycznego wózka podnośnikowego X, Praca magisterska Wydziału Mechanicznego PW. (niepublikowana), Wrocław: 2009.

26. Gross D., Pinkus C. E. Designing a support system for repairable items. *Computers & Operations Research* 1979; 6(2): 59-68.
27. Guo R., Ascher H., Love E. Towards practical and synthetical modelling of repairable systems. *Economic Quality Control* 2001; 16(2): 147-182.
28. Guo R., Ascher H., Love E. Generalized models of repairable systems a survey via stochastic processes formalism. *ORiON* 2000; 16(2): 87-128.
29. Hennet J-C., Tarbouriech S. Stability conditions of constrained delay systems via positive invariance. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 1998; 8: 265-278.
30. Jodejko-Pietruczuk, A., Werbińska-Wojciechowska, S. Time between inspections optimization for technical object with time delay. *Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars* 2013; 4(1): 35-41.
31. Jodejko-Pietruczuk, A., Werbińska-Wojciechowska, S. A delay-time model with imperfect inspections for multi-unit systems. *Journal of KONBiN* 2012; 3: 157-172.
32. Jodejko-Pietruczuk, A., Werbińska-Wojciechowska, S. Economical effectiveness of Delay Time approach using in Time-Based maintenance modelling, *Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.*
33. Jodejko-Pietruczuk, A., Werbińska-Wojciechowska, S. Analysis of Block-Inspection Policy parameters from economical and availability point of view. *Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.*
34. Kobbacy, K. A. H., Murthy D. N. P. *Complex System Maintenance Handbook.* Springer, 2008.
35. Lee, Ch. *Applications of Delay Time Theory to Maintenance Practice of Complex Plant.* PhD thesis. Salford: University of Salford, 1999.
36. LV, W., Wang, W. Modelling preventive maintenance based on the delay time concept in the context of a case study. *Eksploracja i Niezawodność-Maintenance and Reliability* 2011; 3: 5-11.
37. Mabini M. C., Christer A. H. Controlling multi-indenture repairable inventories of multiple aircraft parts. *Journal of the Operational Research Society* 2002; 53: 1297-1307.
38. Mazzuchi T. A., van Noortwijk J. M., Kallen M. J. Maintenance optimization. *Technical Report TR-2007-9*, 2007.
39. Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S. Developments of time dependencies modeling concepts. *Proc. of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011, Troyes, France, 18-22 September 2011, Leiden: CRC Press/Balkema, 2012: 832-838.*

40. Okumura S. An Inspection Policy for Deteriorating Processes Using Delay-Time Concept. *International Transactions in Operational Research* 1997; 4(5-6): 365-375.
41. Okumura S., Jardine A. K. S., Yamashina, H. An inspection policy for a deteriorating single-unit system characterized by a delay-time model. *International Journal of Production Research* 1996; 34(9): 2441-2460.
42. Ozekici S. (ed.). *Reliability and Maintenance of Complex Systems*. NATO ASI Series, Series F: Computer and Systems Sciences, 154, Springer, 1996.
43. Pillay A., Wang J., Wall A. D. A maintenance study of fishing vessel equipment using delay-time analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 2001; 7(2): 118-127.
44. Redmond, D. F. *Delay Time Analysis in Maintenance*. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1997.
45. Sadananda Upadhyaya K., Srinivasan N. K. Availability of weapon systems with multiple failures and logistic delays. *International Journals of Quality and Reliability Management* 2003; 20(7): 836-846.
46. Sarkar A., Panja S. Ch., Sarkar B. Survey of maintenance policies for the Last 50 Years. *International Journal of Software Engineering and Applications* 2011; 2(3): 130-148.
47. Subramanian R., Natarajan R. An n-unit standby redundant system with r repair facilities and preventive maintenance. *Microelectronics Reliability* 1982; 22(3): 367-377.
48. Thomas L.C., Gaver D.P., Jacobs P.A. Inspection models and their application. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1991; 3: 283-303.
49. Ushakow I. *Handbook of reliability engineering*, New York: Wiley, 1994.
50. Valdez-Flores C., Feldman R. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics* 1989; 36: 419-446.
51. Vlajic J. V., van der Vorst J. G. A. J. , Hendrix E. M. T. Food supply chain network robustness – A literature review and research agenda. *Proc. of the International Conference on Management in Agrifood Chains and Networks*, 2008. Wageningen, the Netherlands, 2008.
52. Wang, W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modeling. *Reliability Engineering and System Safety* 2012; 106: 165-178.
53. Wang, W. Modeling planned maintenance with non-homogeneous defect arrivals and variable probability of defect identification. *Eksploatacja i Niezawodnos-Maintenance and Reliability* 2010; 2: 73-78.

54. Wang W. Subjective estimation of delay-time distribution in maintenance modelling. *European Journal of Operational Research* 1997; 99(3): 511-529.
55. Wang W., Christer A. H. Towards a general condition based maintenance model for a stochastic dynamic system. *Journal of the Operational Research Society* 2000; 51: 145-155.
56. Wang K-H., Hsieh Y. Reliability of a repairable system with spares and a removable repairman. *Microelectronics Reliability* 1995; 35(2): 197-208.
57. Wang K-H., Sivazlian B. D. Reliability of a system with warm standbys and repairmen. *Microelectronics Reliability* 1989; 29(5): 849-860.
58. Ważyńska-Fiok K., Jaźwiński J. *Niezawodność systemów technicznych*. Warszawa: PWN, 1990.
59. Werbińska-Wojciechowska S. Time dependencies in supply chain performance process. *Logistics and Transport* 2010; 1: 113-121.
60. Werbińska S. Model logistycznego wsparcia systemu eksploatacji środków transportu. Rozprawa doktorska Wydziału Mechanicznego PWr., Wrocław: 2008.
61. Werbińska S. Model niezawodności systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową. *Logistyka* 2007; 3.
62. Werbińska S. Interactions between logistic and operational system – an availability model. In: *Risk, reliability and societal safety*. Eds Aven T., Vinnem J. E., Vol. 2, Leiden: Taylor and Francis, 2007: 2045-2052.
63. Zhao, J., Jia, X. An optimal policy of inspection for a component with delayed repair. *Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability* 2009; 3: 20-23.

**dr inż. Sylwia Werbińska-Wojciechowska**

Wydział Mechaniczny

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspińskiego 27, 50-370, Wrocław, Polska

e-mail: [sylwia.werbinska@pwr.wroc.pl](mailto:sylwia.werbinska@pwr.wroc.pl)