

Sylwia Werbińska-Wojciechowska, Paweł Zajac

Wydział Mechaniczny, Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, Polska
e-mail: sylwia.werbinska@pwr.edu.pl, pawel.zajac@pwr.edu.pl

Zastosowanie koncepcji opóźnień czasowych w procesie modelowania utrzymania w stanie zdatności systemów technicznych i logistycznych. Studium przypadku.

Słowa Kluczowe: koncepcja opóźnień czasowych, utrzymanie zdatności, system logistyczny

Abstrakt: W artykule przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem utrzymania systemów logistycznych w stanie zdatności z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych. Przedstawiono przegląd literatury z badanego obszaru obejmujący okres 1984-2012. Następnie został omówiony algorytm postępowania w procesie implementacji koncepcji opóźnień czasowych w obszarze utrzymania w stanie zdatności systemów logistycznych. W ostatnim punkcie, został przedstawiony przykład zastosowania opracowanej metodyki do oceny niezawodności i oczekiwanych kosztów obsługiwanego dziesięciu wózków widłowych funkcjonujących w wybranym systemie.

Symbole wykorzystane w pracy:

- c_b – oczekiwany koszt naprawy
- c_{con} – oczekiwane koszty konsekwencji dla systemu wspieranego i otoczenia, wywołane pojawieniem się uszkodzenia systemu logistycznego
- c_i – koszt realizacji operacji kontroli stanu systemu
- c_{ir} – oczekiwany koszt naprawy realizowanej podczas operacji kontroli stanu systemu
- $C(T)$ – funkcja oczekiwanych kosztów utrzymania systemu
- $C_C(T)$ – funkcja oczekiwanych kosztów konsekwencji pojawienia się uszkodzenia dla systemu wspieranego i otoczenia
- C_{utr} – całkowite oczekiwane koszty utrzymania systemu w cyklu obsługiwanego
- d – czas realizacji operacji kontroli stanu systemu
- d_b – losowy czas niezdatności systemu w wyniku jego uszkodzenia
- $E_d(T)$ – funkcja oczekiwanego czasu niezdatności systemu
- $E(h)$ – oczekiwana wartość opóźnienia czasowego
- $F(T)$ – funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy systemu
- $f(T)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy systemu
- $f_1(T)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas do pierwszego uszkodzenia systemu
- $F_h(h)$ – funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej opóźnienie czasowe h

$f_h(h)$	– funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej opóźnienie czasowe h
h	– zmienna losowa opisująca opóźnienie czasowe
k	– stała intensywność pojawiania się uszkodzeń w systemie
$MTBF$	– (ang. <i>Mean Time Between Failures</i>) średni czas między uszkodzeniami systemu
$MTTR$	– (ang. <i>Mean Time To Repair</i>) średni czas naprawy systemu
$P_b(T)$	– funkcja prawdopodobieństwa pojawienia się uszkodzenia systemu
$R(T)$	– funkcja niezawodności systemu
T	– okres między realizacją kolejnych operacji kontroli stanu systemu
T_{opt}	– optymalny okres między realizacją kolejnych operacji kontroli stanu systemu

1. Wprowadzenie

Efektywne funkcjonowanie systemów/sieci logistycznych czy łańcuchów dostaw wymaga poprawnego zdefiniowania m.in. relacji czasowych, występujących pomiędzy obiektami systemu i jego procesami. Problem ten nabrał szczególnego znaczenia na przestrzeni ostatnich 30 lat. Związane jest to z jednej strony ze wzrostem świadomości kadry zarządzającej odnośnie konieczności kontroli kosztów eksploatacji systemów technicznych oraz systemów logistycznych je wspierających. Z drugiej strony, większa dostępność metod i narzędzi wspierających procesy modelowania zapewnia możliwość badania i rozwiązywania nowych problemów z analizowanego obszaru naukowego [87].

Problem opóźnień czasowych charakteryzuje wiele fizycznych czy technicznych systemów i poruszany jest m.in. w biologii, mechanice czy ekonomii [38]. Czas w systemach logistycznych tradycyjnie postrzegany jest w odniesieniu do [10]:

- czasu realizacji zamówienia klienta (wewnętrznego oraz zewnętrznego) – określającego czas od chwili złożenia zamówienia przez klienta, do chwili jego pełnej realizacji. W tym przypadku koncepcja czasu jest odniesiona do poziomu funkcjonowania przedsiębiorstwa wspieranego postrzeganego przez klienta;
- efektywności wykorzystania zasobów w procesach podstawowych przedsiębiorstwa wspieranego. Przykładowo w przypadku systemów produkcyjnych koncepcja czasu jest bezpośrednio powiązana z minimalizacją czasów przestojów oraz optymalizacją wykorzystania mocy produkcyjnych;
- czasu trwania poszczególnych procesów podstawowych, obejmującego okres od chwili, kiedy wszystkie zasoby niezbędne do realizacji procesu są gotowe do wykorzystania, do chwili uzyskania efektu przeprowadzonego procesu. Koncepcja czasu bezpośrednio uzależniona jest od dokładności przeprowadzonej identyfikacji struktury procesu.

W związku z tym, prawidłowe określenie relacji czasowych w systemie logistycznym będzie zależało m.in. od rodzaju modelowanego systemu (magazynowy, transportowy, itp.), 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 m.in. w pracach [88, 89].

W artykule skupiono się na przedstawieniu zagadnienia związanego z modelowaniem utrzymania w stanie zdatności systemów logistycznych z wykorzystaniem analizy opóźnień czasowych (ang. *Delay Time Analysis*), ze szczególnym uwzględnieniem metodyki zastosowania koncepcji opóźnień czasowych (ang. *Delay Time concept*) w praktyce. W

drugiej części artykułu skupiono się na analizie systemu transportu bliskiego przedsiębiorstwa produkcyjnego z sektora metalurgicznego. Zastosowano proponowaną metodykę do oceny niezawodności i oczekiwanych kosztów eksploatacji pracujących wózków widłowych.

2. Modelowanie procesów utrzymania systemów technicznych i logistycznych z wykorzystaniem analizy opóźnień czasowych

Prace opublikowane na przestrzeni ostatnich 50. lat obejmują szeroki zakres problemów z obszaru modelowania i projektowania procesów utrzymania w stanie zdatności obiektów technicznych (ang. *maintenance theory*). Zagadnienia często poruszane w literaturze dotyczą obszaru modelowania niezawodności czy zapewnienia niezbędnych materiałów eksploatacyjnych w procesach eksploatacji m.in. systemów produkcyjnych, transportowych (np. prace [6, 46, 47, 65, 72, 75, 76]), czy niepewności danych eksploatacyjnych (np. prace [7, 57, 93]). Podstawowy przegląd tych prac został przedstawiony w jednym z pierwszych artykułów - [62], a następnie rozwinięty przez autorów Valdez-Flores & Feldman w [74]. Wagę zadań związanych z analizowanym obszarem badawczym oraz jego zróżnicowanie potwierdza szereg opracowań (m.in. [18, 52, 53, 54, 55, 61, 69, 77]), gdzie autorzy przedstawiają przegląd podstawowych modeli doboru optymalnej strategii obsługi systemów jedno- i wieloelementowych. Jednocześnie prace poświęcone zagadnieniu utrzymania w stanie zdatności systemów jednoelementowych są analizowane m.in. w [5, 36, 69, 77], natomiast optymalizacji procesów obsługi systemów wieloelementowych m.in. w [18, 34, 55, 59, 67, 71].

Jednym z podstawowych zadań związanych z utrzymaniem w stanie zdatności funkcjonalnej i zadaniowej obiektów technicznych jest proces kontroli stanu tych obiektów (ang. *Inspection process*) [18, 62]. W tym obszarze możliwe jest wykorzystanie koncepcji opóźnień czasowych, umożliwiającej modelowanie konsekwencji zastosowania polityki kontroli stanu systemu (ang. *Inspection Policy*) dla obiektów technicznych [23].

Dane podejście, wykorzystywane 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), od lat 70. XX w. jest przedmiotem analiz m.in. autorów Christer, Waller i Whitelaw (np. [22, 23, 28, 29, 30, 32]). W koncepcji tej, zakłada się iż uszkodzenie systemu/elementu nie następuje w sposób skokowy, lecz jest poprzedzone pojawieniem się pewnych symptomów świadczących o przyszłym uszkodzeniu [24]. 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 [21, 24]. Rozwinięcie danego zagadnienia można znaleźć m.in. w pracach [43, 44, 58].

Znane w literaturze modele opóźnień czasowych (ang. *Delay-time models*) można podzielić na dwie główne grupy [81]:

- modele dla systemów jednoelementowych oraz modele dla systemów złożonych (*complex systems*), traktowanych jako jeden obiekt techniczny;
- modele dla systemów wieloelementowych.

Temat ten jest szeroko analizowany w literaturze, m.in. w pracach [2, 8, 19, 20, 21, 24, 25, 48, 58, 64, 77, 78], gdzie przedstawiono przegląd literatury z obszaru zastosowania koncepcji opóźnień czasowych, oraz w pracach [43, 44, 58, 86], gdzie skupiono się na możliwościach stosowania modeli opóźnień czasowych w systemach wieloelementowych.

Jedną z pierwszych prac poświęconych modelowaniu opóźnień czasowych systemów jednoelementowych jest [27]. W pracy tej autor analizuje proces podejmowania decyzji w obszarze obsługiwanego systemu (wymiana elementu na nowy) w oparciu o badania ankietowe. Ponadto, w tym obszarze autorzy analizowali m.in. problemy nieuszkodzalności systemów (np. prace [4, 16, 22, 41, 94]), estymacji parametru opóźnienia czasowego (np. praca [9]), analizy ryzyka (np. [82]), implementacji procesów semi-Markova (np. [31]), czy bezpieczeństwa procesu kontroli stanu systemu (np. [84]).

Podstawowy model opóźnień czasowych dla systemów wieloelementowych został przedstawiony m.in. w pracach [24, 29, 30, 82]. Podstawowe założenia modelu obejmują perfekcyjny proces kontroli stanu systemu, niezależność funkcjonujących elementów systemu, proces Poissonowski pojawiania się defektów w systemie, znaną funkcję $f_h(h)$, oraz stały okres d kontroli stanu systemu. Dla tak przyjętych założeń, możliwe jest wyznaczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia systemu $P_b(T)$, czy funkcji oczekiwanego czasu niezdatności systemu $E_d(T)$.

Rozwinięcie danego modelu obejmuje m.in. założenie o nie perfekcyjnej kontroli stanów systemu (np. [14, 21, 79, 80]), czy nie Poissonowski proces pojawiania się defektów w systemie (np. [3]). Ponadto, analizowany jest problem estymacji parametrów modelu (np. [21, 80, 81, 85]).

3. Metodyka zastosowania koncepcji opóźnień czasowych w procesie modelowania utrzymania w stanie zdatności systemów technicznych i logistycznych

W literaturze można znaleźć wiele prac poświęconych zastosowaniu koncepcji opóźnień czasowych w obszarze funkcjonowania systemów rzeczywistych. Podstawowe obszary aplikacji modeli obejmują m.in. procesy obsługiwanego systemu produkcyjnych (np. [1, 45]), procesy uszkodzeń skrzyni biegów autobusów (np. [49]), modelowania procesów obsługiwanego systemu: floty pojazdów (np. [28, 35, 40, 68]), statków rybackich (np. [63]), czy sprzętu medycznego (np. [26]). Ważnym obszarem potencjalnego zastosowania danego podejścia jest również funkcjonowanie systemów logistycznych.

Podstawowe funkcje logistyki obejmują skuteczne, wydajne i efektywne zarządzanie: przepływem zasobów i magazynowaniem dóbr (surowców, materiałów, półwyrobów i wyrobów gotowych) i usług, od źródeł ich pochodzenia do miejsca konsumpcji, oraz informacji, związanej z tym przepływem w celu zaspokojenia potrzeb i wymagań klientów [91]. W związku z tym, w obszarze logistyki przedsiębiorstwa efektywność procesów logistycznych podmiotów uczestniczących w łańcuchu logistycznym polega na utrzymaniu równowagi pomiędzy: wzrostem popytu na zasoby podstawowe i wspierające, coraz krótszym czasem realizacji zadań logistycznych a kontrolą kosztów w całym łańcuchu [11, 90, 91] w oparciu o trzy filary logistyki przedstawione m.in. w [56].

Jednocześnie, problemy logistyki można także zdefiniować w obszarze funkcjonowania systemów technicznych [88]. Realizacja procesu eksploatacji obiektu technicznego wymaga uwzględnienia funkcji wspierających przyjętego łańcucha logistycznego. Opierając się na podstawowej literaturze z zakresu inżynierii logistycznej (np. [12, 13, 17]), przy zastosowaniu podejścia systemowego w logistyce, można zdefiniować system wsparcia logistycznego, który wg [12, 17] jest określany jako *celowo zorganizowany podsystem systemu technicznego, wspierający jego proces podstawowy (eksploatacji) poprzez integrację wszystkich działań, związanych z efektywnym i korzystnym przepływem niezbędnych zasobów rzeczowych i informacyjnych oraz wspierający obsługę procesu eksploatacji w zakresie zapewnienia koniecznego dla tego procesu zaplecza logistycznego (wyposażenia wspierającego i kontrolno-pomiarowego)*. Przedstawiona definicja odnosi się z

jednej strony do cyklu istnienia systemu, a z drugiej strony obejmuje zarówno cechy logistyki przedsiębiorstwa jak i logistyki wojskowej.

W rozważaniach logistycznych wyróżnić można dwa podstawowe pojęcia dotyczące stanów niezawodnościowych systemu wsparcia logistycznego: zdalny do zrealizowania zadań, jakie stawia się systemowi logistycznemu oraz stan niezdatności, który może doprowadzić do, np. [50]:

- zakłócenia lub wręcz uniemożliwienia podjęcia realizacji bieżącego zadania logistycznego,
- niezdatności do podjęcia realizacji nowych zadań logistycznych.

Uwzględnienie stanu zawodności systemu wspierającego definiuje nowe spojrzenie na sprawne i efektywne funkcjonowanie systemu podstawowego, które wymaga przeanalizowania zdolności systemu logistycznego do realizacji określonych zadań, w określonych warunkach i w określonym czasie, kiedy losowo do systemu zostanie zgłoszona potrzeba logistyczna.

W dostępnej literaturze teorii niezawodności można znaleźć szereg prac, dotyczących zagadnienia modelowania i oceny poziomu funkcjonowania systemów logistycznych, projektowanych dla wsparcia obiektów technicznych podlegających procesom obsługi. Opracowane modele ograniczone są jednak przede wszystkim do analizy procesu zaopatrzenia systemu technicznego w niezbędne części wymienne (np. [15]) przy uwzględnieniu problemu zapewnienia niezbędnej liczby stanowisk obsługi/ekip remontowych (np. [37, 66, 70]) nie badając wpływu funkcjonowania innych elementów logistycznych na poziom niezawodności systemu wspieranego.

Inne zagadnienia omawianego obszaru, które wymagają dalszej analizy można wyróżnić m.in. w obszarze oceny źródeł dostaw, problemów zarządzania zapasami, uwzględnienia ograniczeń składowania zapasów oraz integracji zadań logistycznych z celami strategii obsługi obiektów technicznych [51].

Jednocześnie, na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat można zaobserwować wyraźny wzrost zainteresowania zagadnieniami zarządzania czasem czy analizy relacji czasowych występujących w systemach/obiektach technicznych, również w logistycznych. Przegląd podstawowych problemów badawczych związanych z modelowaniem relacji czasowych łańcuchów logistycznych przedstawiono m.in. w pracy [60].

Mając na względzie powyższe oraz biorąc pod uwagę stopień złożoności systemów wsparcia logistycznego, prawidłowe modelowanie procesów ich funkcjonowania może być oparte o wykorzystanie koncepcji opóźnień czasowych. W takim przypadku, efektywne opracowanie modelu obsługi systemu logistycznego wymaga zastosowania odpowiedniej metody postępowania [45].

Problem ten analizowany jest m.in. w pracy [63], gdzie przedstawiono algorytm zastosowania koncepcji opóźnień czasowych w obszarze funkcjonowania systemów złożonych. Następnie w pracy [83] autorzy zaproponowali algorytm modelowania procesu kontroli stanu systemów wieloelementowych, w których proces pojawiania się defektów jest typu NHPP. Metodyka modelowania opóźnień czasowych w systemach produkcyjnych została z kolei omówiona w pracy [45]. Autorzy zaproponowali algorytm postępowania dla przypadku funkcjonowania systemów złożonych, jednocześnie uzupełniając modele oszacowania oczekiwanych kosztów obsługi systemu i oczekiwanego okresu niezdatności o tzw. model oceny konsekwencji uszkodzenia (*environmental model*), definiujący wpływ uszkodzenia maszyny produkcyjnej na funkcjonowanie przedsiębiorstwa produkcyjnego (np. przestoje produkcji).

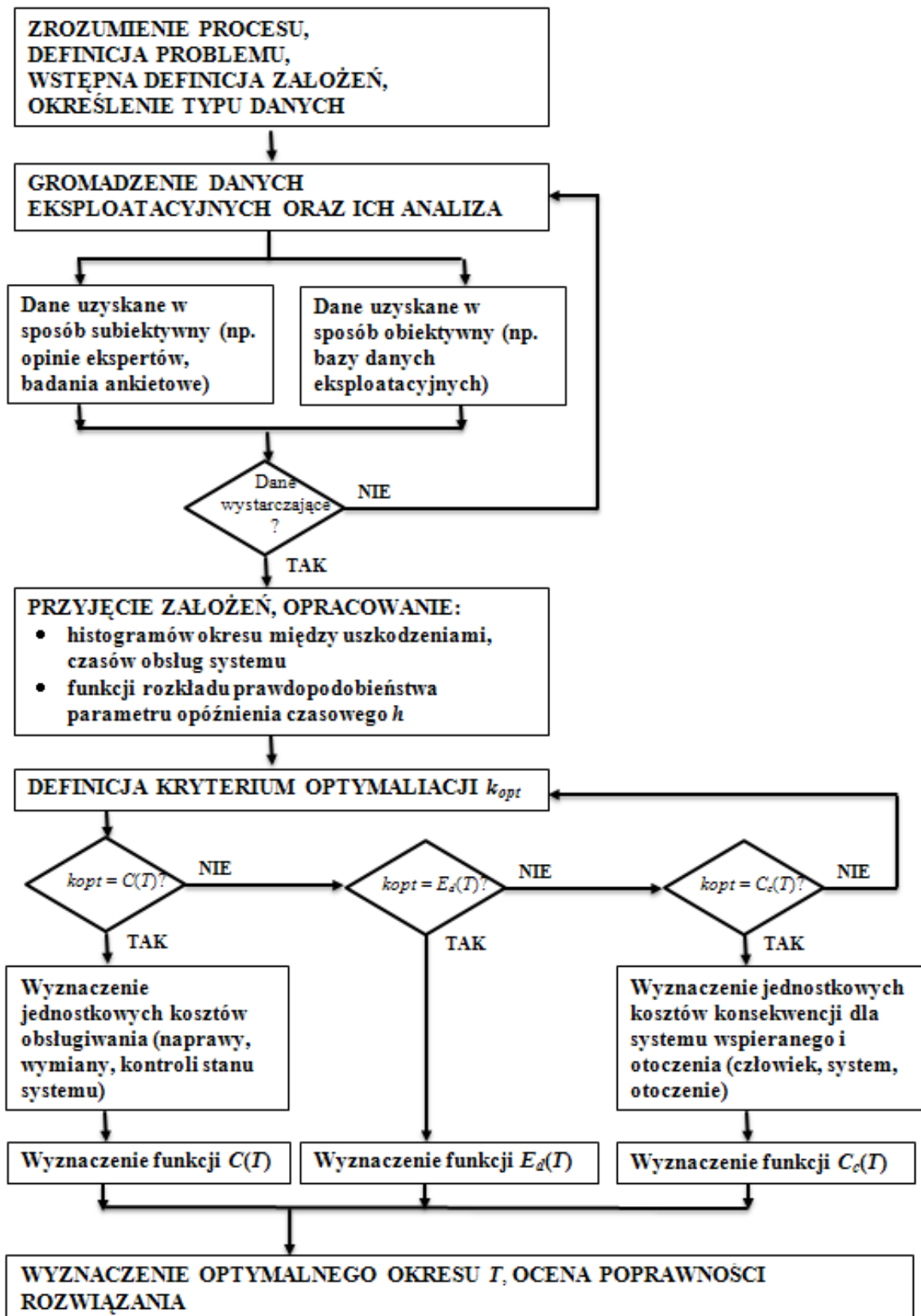
Metodyka modelowania procesów utrzymania w stanie zdalności systemów technicznych z uwzględnieniem koncepcji opóźnień czasowych w przypadku zastosowania

symulacji metodami Monte Carlo została opracowana w pracy [33]. Autorzy zaproponowali algorytmy postępowania dla przypadku perfekcyjnej/nieperfekcyjnej operacji kontroli stanu obiektu (*perfect/imperfect inspection*), oraz dla przypadku nieperfekcyjnej operacji naprawy (*imperfect repair*).

Opracowując metodykę modelowania procesów utrzymania w stanie zdatności systemów technicznych z uwzględnieniem koncepcji opóźnień czasowych, należy zwrócić uwagę iż celem modelu zwykle jest minimalizacja oczekiwanego czasu niezdatności systemu $E_d(T)$, lub oczekiwanych kosztów utrzymania $C(T)$. Jednocześnie, w przypadku funkcjonowania systemów logistycznych, istotny jest także wpływ procesu uszkodzeń ich elementów na poziom funkcjonowania systemu wspieranego oraz otoczenie. Poziom tego oddziaływania może być wyrażony poprzez funkcję oczekiwanych kosztów konsekwencji uszkodzenia systemu logistycznego $C_C(T)$. Z drugiej strony w dalszych rozważaniach pomija się możliwość przeprowadzania analizy wielokryterialnej.

Algorytm postępowania przy określeniu optymalnego okresu między realizacją operacji kontroli stanu systemu T obejmuje następujące etapy (rys. 1) [33, 45, 83]:

- zrozumienie procesu utrzymania w stanie zdatności wybranego systemu (np. określenie typu realizowanych operacji obsługiwanie, zależności między elementami systemu);
- określenie problemów w obszarze eksploatacji wybranego systemu (np. długotrwałe operacje naprawy, częste uszkodzenia);
- wstępna definicja założeń modelu (np. jedno-/wieloelementowy system), określenie typu danych eksploatacyjno-diagnostycznych, które mogą i powinny być gromadzone w celu przeprowadzenia optymalizacji procesów obsługiwanie;
- gromadzenie danych oraz ich analiza – w oparciu o wykorzystanie metod obiektywnych i subiektywnych;
- określenie założeń modelu – w oparciu o uzyskane dane i wiedzę o realizowanych procesach eksploatacji;
- oszacowanie podstawowych parametrów modelu – np. funkcji $f_h(h)$ i $F_h(h)$ parametru opóźnienia czasowego h , doboru rozkładu prawdopodobieństwa dla czasu między uszkodzeniami czy czasu obsługiwanie;
- definicja kryterium optymalizacji – w zależności od dostępnych danych eksploatacyjnych oraz przyjętych założeń modelu;
- oszacowanie funkcji kryterium optymalizacji, wyznaczenie optymalnego okresu T ;
- określenie relacji pomiędzy oczekiwaną wartością parametru opóźnienia czasowego i optymalnego okresu T – w celu określenia, czy koncepcja opóźnień czasowych pozwala uzyskać optymalne rozwiązanie (więcej informacji np. w pracach [43, 44]).



Rys. 1. Algorytm wyznaczenia optymalnego okresu T z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych

Opracowanie własne w oparciu o [33, 45, 83]

Istotny jest sposób wyznaczenia funkcji kryterialnych modelu. Postać funkcji będzie uzależniona od przyjętych założeń systemu. Przykładowo, dla przypadku systemu złożonego jednym z podstawowych modeli przeglądu okresowego, bazujących na zastosowaniu koncepcji opóźnień czasowych jest model kontroli okresowej stanu obiektu przedstawiony w pracy [30]. 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 c_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 funkcja prawdopodobieństwa pojawienia się uszkodzenia systemu $P_b(T)$ opisana jest wzorem [30]:

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

Oczekiwany czas niezdatności, definiowany funkcją $E_d(T)$, można opisać następująco [30]:

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

Jednocześnie, przyjmując wartości oczekiwane kosztów naprawy c_b , oczekiwanych kosztów naprawy w trakcie realizacji operacji kontroli stanu obiektu c_{ir} , oczekiwany koszt utrzymania obiektu w okresie T można opisać funkcją $C(T)$ o postaci [30, 45]:

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

Następnie oczekiwane koszty konsekwencji dla systemu wspieranego i otoczenia $C_c(T)$, wywołane pojawieniem się uszkodzenia systemu logistycznego można przedstawić jako:

$$C_c(T) = \frac{1}{(T+d)} \{kTc_{con} P_b(T)\} \quad (4)$$

gdzie:

c_{con} – oczekiwane koszty konsekwencji dla systemu wspieranego i otoczenia, wywołane pojawieniem się uszkodzenia systemu logistycznego (związane np. ze stratami w ludziach, poziomem uszkodzenia systemu wspieranego, opóźnieniem w realizacji procesów podstawowych, itp.)

Natomiast model symulacyjny dla systemów wieloelementowych opracowano m.in. w pracach [42, 43, 44].

4. Studium przypadku

W celu przedstawienia możliwości zastosowania omawianej metodyki zastosowania koncepcji opóźnień czasowych w systemach logistycznych, poddano analizie przedsiębiorstwo produkcyjne – hutę metali kolorowych. W ramach badań skupiono się na procesie eksploatacji wózków widłowych, wykorzystywanych w danym zakładzie produkcyjnym.

Analizowane wózki jezdniowe obsługują przede wszystkim procesy produkcji, przyjmują dostawy materiałów oraz obsługują magazyny wyrobów gotowych, gdzie trafiają wyroby z linii produkcyjnej. Najważniejszym miejscem pracy wózka widłowego jest linia produkcyjna. Wózek widłowy znajduje się w magazynie wsadu topielnego przy windzie towarowo – wsadowej, która zasila piec hutniczy. Zadaniem operatora jest pobieranie wsadu za pomocą wózka widłowego z rampy lub placu manewrowego (zgodnie z założeniami produkcyjnymi), włożenie go do windy wsadowej, skąd wsad trafia do pieca topielnego. Praca odbywa się tu w sposób ciągły, nieprzerwalny i tryzmianowy. W czasie jednej zmiany topi się około 350 ton materiału wsadowego. Dwa wózki skierowane do obsługi produkcji łącznie w ciągu jednej zmiany przepracowują około 14 mth¹. Warunki pracy są zmienne, podobnie jak w przypadku przyjmowania dostaw. Dodatkowo wózki obsługujące produkcję często wywożą ciekły materiał o wysokiej temperaturze, która sięga nawet 900°C. Wówczas temperatura w kabinie operatora wzrasta gwałtownie do około 65°C.

Kolejnym miejscem pracy wózka widłowego jest rampa rozładowcza, gdzie przyjmuje się dostawy materiału dostarczane drogą kolejową, oraz plac manewrowy, na który trafiają dostawy dostarczane taborem samochodowym. Na rampie kolejowej pracuje jednocześnie od 4 ÷ 6 wózków widłowych, które rozładowują wagony kolejowe z paczek wsadowych do produkcji, w których skład wchodzi 5 ÷ 24 blach o wadze ok. 1800 kg każda. Dzienna dostawa kolejowa składa się z 19 wagonów.

Równorzędnym miejscem pracy operatorów pracujących na rampie kolejowej jest plac manewrowy, gdzie rozładowują oni samochody ciężarowe z takich samych paczek, jak wagony kolejowe. Tu trafiają paczki wsadowe o wadze około 2500 kg każda. Dziennie dostarcza się ich około 300 ton. Praca w tych miejscach odbywa się w zmiennych i ciężkich warunkach atmosferycznych. Wózki muszą radzić sobie z olbrzymimi przeciążeniami związanymi z upałem, opadami śniegu i występującymi gołoledziami, kiedy dochodzi do boksowania kół. W zakładzie występuje ogólnie duże zapylenie i kurze. Podobna sytuacja ma miejsce na rampie rozładowczej, dlatego też wózki posiadają potrójny system filtrowania powietrza i są dokonywane częstsze przeglądy, polegające na przedmuchiwaniu dolotów powietrza i chłodnic.

Poza głównymi miejscami pracy, jakimi są obsługa produkcji czy przyjmowanie dostaw, wózki widłowe prowadzą w ciągu zmiany szereg innych prac związanych z utrzymaniem ruchu na rzecz pozostałych wydziałów zakładu. Są to tzw. prace gospodarcze. Do prac tych należy np. codzienne zaopatrywanie wydziałów w gazy techniczne, sole i środki chemiczne, dostarczanie z magazynów materiałów technicznych niezbędnych do utrzymania ruchu produkcyjnego, zaopatrywanie wydziałów pakowania w taśmy stalowe i strecz którymi są pakowane wyroby gotowe.

¹ 1 motogodzina (ang. *motohour*) (skrót: mth) – zgodnie z definicją zaproponowaną przez Słownik Języka Polskiego PWN [39] – godzina pracy silnika.

Jednostka miary standardowo wykorzystywana do oceny czasu eksploatacji wózków jezdniowych podnośnikowych; m.in. stan licznika motogodzin jest podawany dla czasów przeprowadzonych przeglądów okresowych, czy napraw w Dzienniku Konserwacji Wózka Widłowego, który m.in. zgodnie z ustawą o Dozorze Technicznym z dnia 21 grudnia 2000 r. od dnia 18 sierpnia 2003 r. [73] mają obowiązek prowadzić właściciele/użytkownicy wózków widłowych.

Dane niezbędne do przeprowadzenia analizy niezawodności obejmują dane serwisowe dziesięciu elektrycznych wózków widłowych wybranej marki, obejmujące okres eksploatacji od roku 2000 do lutego 2013. Zawierają dokładny przebieg pracy wózków, czasy trwania remontów i przeglądów, wyszczególnienie wymienianych elementów oraz wszelkich usterek, które wystąpiły w tym czasie.

4.1. Proces eksploatacji wózków widłowych i analiza danych eksploatacyjnych

Trasy pracy wózka widłowego są zmienne i zależą w szczególności od zadań, jakie wykonuje. Do najczęstszych i regularnych operacji należą załadunek pieca – obsługa produkcji i przyjmowanie dostaw. Operator po krótkiej odprawie na początku każdej zmiany wypisuje sprzęt, który pobiera, w tzw. raporcie pracy wózka widłowego. W raporcie tym operator dokonuje następującego wpisu (wpis operatora na przykładzie wózka widłowego nr. 4 z dnia 29-10-2010 roku): Data pobrania: 29-10-2010 r. Zmiana: I, stan licznika na początku zmiany: 3207 mth, stan techniczny wózka: tu operator dokonuje oględzin sprawdzających sprzęt. Jeśli wózek jest sprawny, to podpisuje w miejscu „*Wózek widłowy sprawny technicznie*”, jeśli nie, opisuje awarię lub uszkodzenie w miejscu awarii. Następnie podpisuje raport w miejscu „*Przyjmuję maszynę*”. Po dokonaniu takiego wpisu w raporcie operator udaje się w miejsce oddelegowania, czyli miejsce pracy, np. załadunek pieca lub rozładunek dostaw. Operator porusza się po magazynie wsadu, placu manewrowym i rampie rozładawczej pokrytych asfaltem i betonem. Praca w wyżej wymienionym dniu na zmianie I. odbywa się od godziny 7.00 do godziny 15.00. Dzienny średni limit przepracowanych motogodzin przez wózek widłowy w wyżej wymienionych miejscach wynosi ok. 7 mth. Operator, który zjeżdża na koniec zmiany na wydział w celu zdania sprzętu, również dokonuje wpisu w raporcie pracy wózka widłowego: składa podpis w rubryce „*Zdający maszynę*”, wpisuje w rubryce ilość wykonanej pracy - w tym przypadku 7 mth. Jeśli po zmianie są jakieś uwagi dotyczące pracy maszyny lub zauważono jakąś awarię, operator ma obowiązek dokonać także wpisu w rubryce „*Awaria*”. Wyżej wymieniony wózek widłowy poruszający się po opisanych trasach i miejscach przejeżdża miesięcznie ok. 170 mth. Rocznie pokonuje nawet 2000 mth. W tym czasie w wózku widłowym zostaje wykonanych 20 obsługa profilaktycznych typu OT-1 (co 100 mth), w której skład wchodzi następujące czynności:

1. przedmuchiwanie całego wózka widłowego (silnik, chłodnice olejowe, wodne);
2. kontrola wszystkich płynów eksploatacyjnych;
3. wymiana filtrów powietrza – bezpieczników;
4. przesmarowanie wszystkich punktów smarnych wózka widłowego;
5. kontrola ogumienia;
6. kontrola części ruchomych wózka widłowego (zawieszenie, układ skrętu, elementy masztu i karetki);
7. kontrola stanu technicznego łańcuchów i karetki;
8. wizualna kontrola sprzętu.

Ponadto, co ok. 500 mth wykonywane są przeglądy profilaktyczne typu OT-2. W ich skład, poza czynnościami wykonywanymi w ramach OT-1, wchodzi dodatkowo następujące czynności:

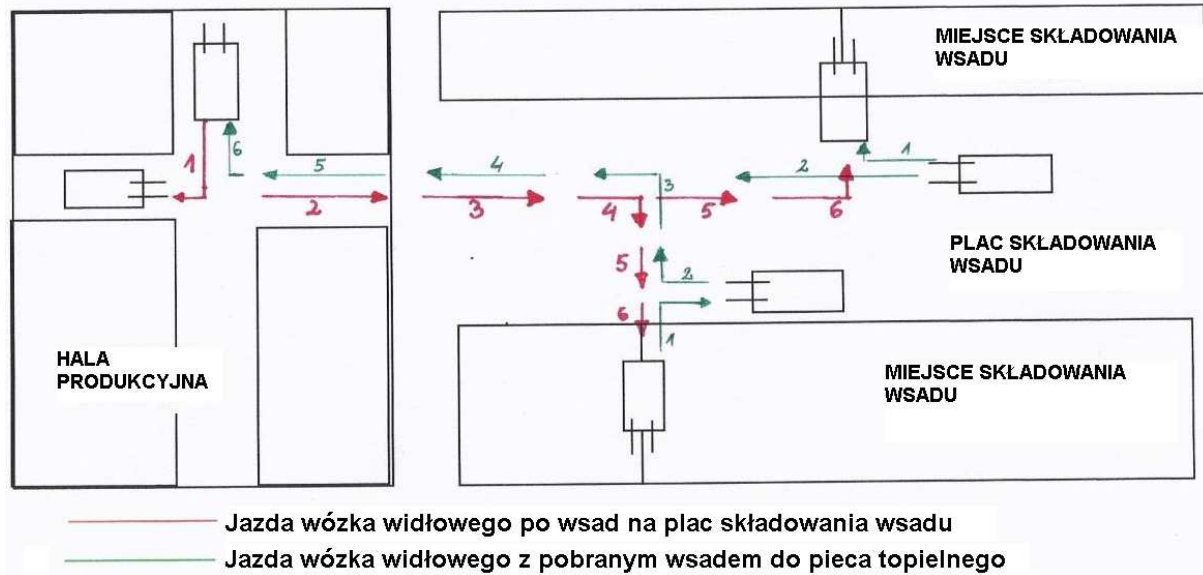
1. wymiana oleju silnikowego z filtrem oleju,
2. wymiana wszystkich filtrów powietrza.

Poza obsługami technicznymi przynajmniej raz do roku, po przejechaniu ok. 1700 mth. wózek widłowy ma wymieniany olej hydrauliczny 65 litrów i olej przekładniowy 15 litrów.

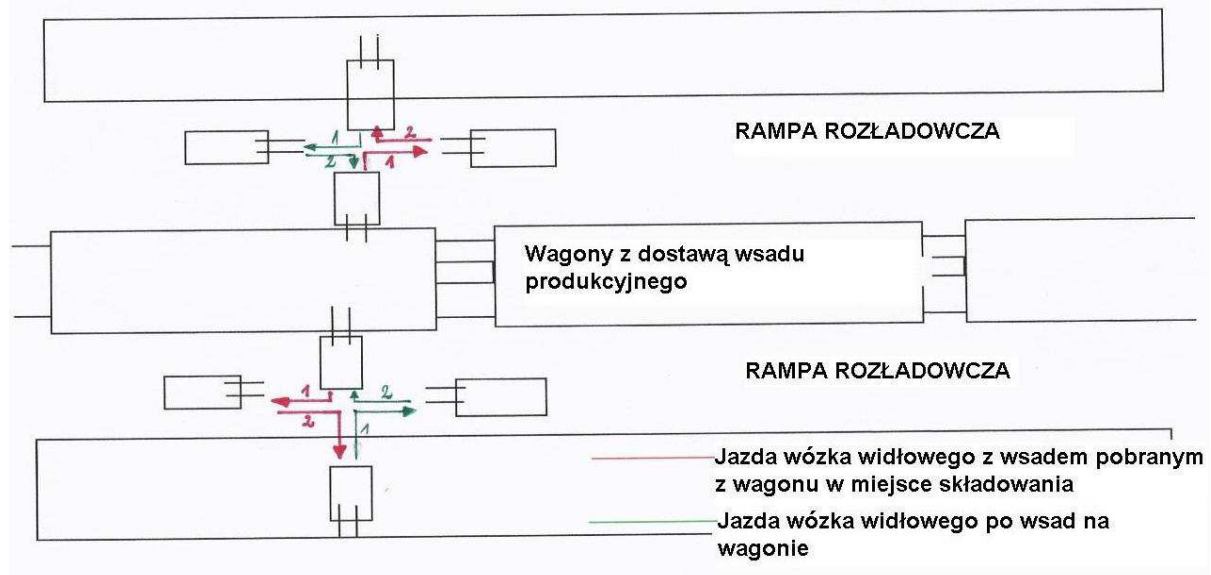
Ponadto wózek zużywa dwa komplety opon przednich i cztery komplety opon tylnych. W tym czasie także spala około 5500 litrów oleju napędowego.

Rysunki 2 i 3 obrazują trasę wózków widłowych przy obsłudze produkcji – załadunek pieca topielnego oraz pracę przy rozładunku dostawy z wsadem topielnym.

Wózek widłowy pracujący przy obsłudze produkcji – załadunek pieca w ciągu jednej zmiany pracuje średnio około 6-7 motogodzin. Pracownicy serwisu, którzy przeprowadzają naprawy i przeglądy gwarancyjne sprzętu przeliczają 1 mth na 100 kilometrów.



Rys. 2. Schemat trasy wózka widłowego pracującego przy załadunku pieca topielnego. Fot. JM.



Rys. 3. Schemat trasy wózka widłowego pracującego przy rozładunku dostaw. Fot. JM.

Średnio przy rozładunku dostaw na rampie rozładawczej i placu pracują cztery wózki widłowe i każdy z nich w ciągu jednej zmiany przepracowuje około 5 mth.

Obecnie zakład huty metali kolorowych dysponuje dwunastoma wózkami widłowymi czterotonowymi marki Komatsu (analizie poddano dziesięć sztuk). Do zalet tego typu

wózków widłowych należy ich prosta i zwarta konstrukcja, łatwość prowadzenia, mała awaryjność, duże, szerokie i wyspecjalizowane zaplecze serwisowe. Ponadto, minimum elektroniki w tych wózkach, 5 cylindrowa jednostka napędowa, zasilana zwykłą pompą wtryskową z wtryskiwaczami powoduje, że wózek staje się niezwykle prostą maszyną w obsłudze i użytkowaniu, zarówno dla operatora, jak i mechanika.

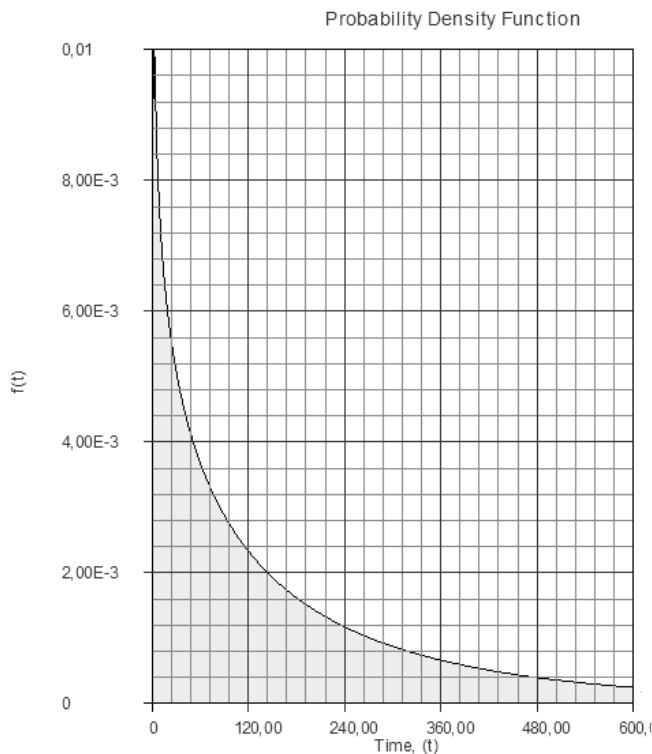
Elektryczny wózek widłowy jest obiektem naprawialnym, tj. obiektem który podlega operacji naprawy po uszkodzeniu². Analiza poziomu niezawodności badanego obiektu została przeprowadzona w oparciu o badania wspomnianego raportu pracy wózka widłowego, zawierającego informacje o przebiegach, wykazie remontów i przeglądów oraz czasach napraw. Podstawowe dane uzyskane w trakcie analizy procesu eksploatacji wózków przedstawione zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry operacyjne analizowanych wózków widłowych

Nr wózka	Przebieg (mth)	Liczba uszkodzeń	MTBF(h)	MTTR (h)
1	3685	97	38,0	5,6
2	3636	82	44,3	6,5
3	5513	100	55,1	6,3
4	7310	107	68,3	6,4
5	1876	26	72,2	5,5
7	3624	79	45,9	6,6
8	2684	51	52,6	7,3
9	4374	89	49,1	7,8
10	4990	50	99,8	6,6
11	5224	67	78,0	6,4

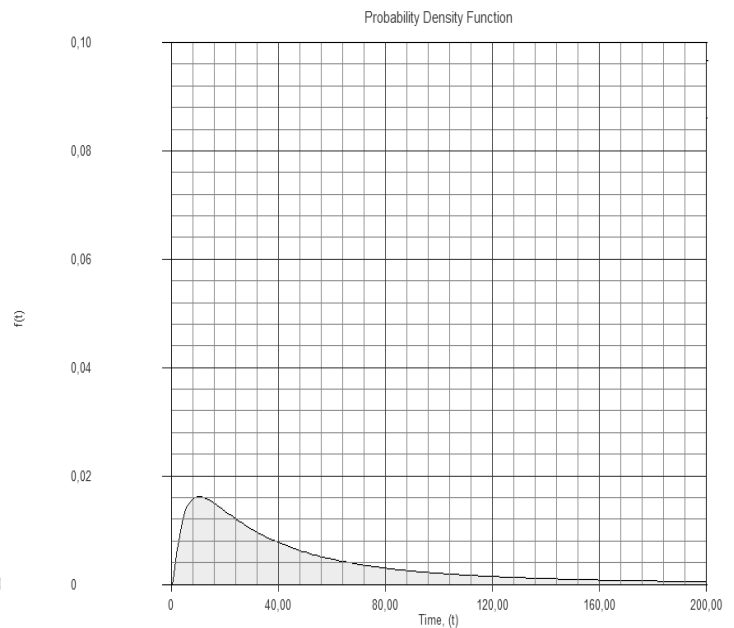
W wyniku badań 10-ciu wózków uzyskano m.in. realizacje czasu zdatności do pierwszego uszkodzenia. Rozkład prawdopodobieństwa czasu pracy wózków do pierwszego uszkodzenia można opisać rozkładem Weibulla (rys. 4). Możliwe było także wyznaczenie m.in. funkcji niezawodności $R(t)$, dystrybuanty $F(t)$, czy 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 lognormalny (rys. 5).

² Zgodnie z definicją podaną w Słowniku eksploatacyjnym PNTTE [92]



$\beta=0,7932, \eta=175,3214, \rho=0,9570$

Rys. 4. Funkcja $f_1(t)$ gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu do pierwszego uszkodzenia



Rys. 5. Funkcja $f(t)$ gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu między uszkodzeniami

W analizowanym okresie czasu zanotowano 748 uszkodzeń w układach ramy i karoserii wózka, instalacji i wyposażenia elektrycznego, w układzie hydraulicznym, podnoszenia, napędowym, kierowniczym, oraz hamulcowym.

Słabym ogniwem analizowanego wózka widłowego są elementy wchodzące w skład tylnego zawieszenia wózka. Dochodzi tu do zużywania się części łączników skrętu oraz części mocujących zwrotnice tylnego koła z belką skrętną. Zauważony problem dotyczył gwałtownego zużycia się tych elementów bez wcześniejszych oznak przyszłego uszkodzenia – nie powstają zauważalne wcześniej luzy. W efekcie nagłe zużycie tych elementów skutkuje zazwyczaj pękaniem i rozsypywaniem łożysk łączników i sworzni zwrotnic kół, co powoduje awarie i przestój maszyny. Inną wadą obecnych wózków widłowych jest fakt, że nie posiadają one seryjnie montowanych kabin. Kabin są montowane dodatkowo w oddzielnych zakładach, zajmujących się zabudową wózków widłowych. Brakuje w tych kabinach także klimatyzacji i odpowiedniej ergonomii ułatwiającej pracę operatora.

4.2. Koszty eksploatacji wózków widłowych

W kolejnym kroku poddano wózki widłowe analizie ekonomicznej. Wyniki przedstawiono dla czterech wózków tego samego typu wyposażonych w silnik 4 cylindrowy o pojemności skokowej 3200 cm³ i mocy 63,000 KW, pracujących w tych samych miejscach i wykonujących te same zadania operacyjne: prace gospodarcze, obsługa produkcji i rozładunek dostaw. W tabelach 2 i 3 przedstawiono zestawienie całkowitych kosztów eksploatacji w latach 2010 i 2011. W danym okresie jednostkowe koszty przeglądu profilaktycznego typu OT-1 i OT-2 wynosiły odpowiednio 230 PLN i 750 PLN. Koszt badań UDT dopuszczających wózek do pracy to kolejne 520 PLN w 2010r i 560 PLN w 2011r.

Tabela 2. Ogólne koszty eksploatacji wózka widłowego w roku 2010

ogólny koszt utrzymania wózków widłowych za rok 2010 [PLN]						
Wózek widłowy:	Koszty zużycia oleju napędowego	Koszty obsługi profilaktycznych	Koszty wymiany opon	Koszty operacji obsługiwan*	Wynagrodzenie mechanika/konserwatora	Średni koszt roczny utrzymania:
W-4	26 413,24	3 800,00	8 573,98	7 488,60	3 000,00 zł	49 275,82
W-6	24 975,72	4 030,00	7 524,52	7 488,60	3 000,00 zł	47 018,84
W-10	26 356,12	3 800,00	8 573,98	7 488,60	3 000,00 zł	49 218,70
W-11	23 309,72	3 800,00	8 573,98	7 488,60	3 000,00 zł	46 172,30
Razem:						191 685,66
* koszty obejmują m.in. operacje okresowej wymiany oleju hydraulicznego, czy badania UDT						

Tabela 3. Ogólne koszty eksploatacji wózka widłowego w roku 2011

ogólny koszt utrzymania wózków widłowych za rok 2010 [PLN]						
Wózek widłowy:	Koszty zużycia oleju napędowego	Koszty obsługi profilaktycznych	Koszty wymiany opon	Koszty operacji obsługiwan*	Wynagrodzenie mechanika/konserwatora	Średni koszt roczny utrzymania:
W-4	28 728,00	5 470,00	10 851,20	7 488,60	3 000,00	55 537,80
W-6	37 700,25	7 890,00	7 524,52	8 516,80	3 000,00	64 631,57
W-10	40 446,00	7 140,00	11 900,66	10 991,80	3 000,00	73 478,46
W-11	32 382,00	6 680,00	10 851,20	8 338,60	3 000,00	61 251,80
Razem:						254 899,63
* koszty obejmują m.in. operacje okresowej wymiany oleju hydraulicznego, czy badania UDT						

Średni koszt jednej roboczogodziny pracownika działu serwisu oszacowano na poziomie 20 zł, co pozwala na wyznaczenie średniego kosztu pracy przy realizacji operacji naprawy/wymiany na poziomie 130 PLN. Średni koszt naprawy wózka widłowego określono na poziomie 2500 PLN, a średni koszt obsługi wózka w trakcie realizacji operacji kontroli stanu systemu z uwzględnieniem pracy konserwatora – na poziomie 1500 PLN.

Ze względu na brak danych, nie ma możliwości oszacowania kosztów konsekwencji uszkodzenia wózka widłowego dla systemu wspieranego (system produkcji) i jego otoczenia.

4.3. Analiza procesu utrzymania w stanie zdatności wózków widłowych z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych

W celu wykorzystania przedstawionego w punkcie 3 algorytmu postępowania, niezbędne jest oszacowanie kilku parametrów. Ze względu na brak możliwości oszacowania parametrów kosztowych obejmujących ocenę wpływu niezdatności wózków widłowych na proces funkcjonowania systemu produkcji, analizie zostanie poddany proces doboru optymalnego okresu T przy uwzględnieniu kryterium oczekiwanego okresu niezdatności i oczekiwanych kosztów utrzymania systemu.

Analizowany system jest systemem wieloelementowym, przy czym podstawowe parametry zostały oszacowane na poziomie:

- czas trwania operacji kontroli stanu systemu d oszacowano na 2 h;
- czas niezbędny na usunięcie uszkodzenia d_b wyniósł 6,5 h (średni czas wszystkich napraw, zanotowanych wśród dziesięciu wózków);
- całkowity czas operacyjny w badanym okresie wyniósł (dla 10 wózków) 42916 roboczogodzin;

- d) stałą intensywność k pojawiania się uszkodzeń w systemie określono na poziomie $k = 0,017155$ na motogodzinę;
e) MTBF na poziomie 58,29 motogodzin, przy odchyleniu standardowym równym 88,24 motogodzin.

W analizowanym przypadku przyjęto, iż proces uszkodzeń w systemie ma charakter Poissonowski ze stałą intensywnością k na poziomie 0,017155 uszk/mth.

Po oszacowaniu danych parametrów, należało także określić opóźnienie czasowe h uszkodzenia, które jest w założeniu niezależnie od intensywności uszkodzeń oraz posiada znaną postać funkcji $f_h(h)$ i $F_h(h)$. 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. Z drugiej strony, bazując na wynikach pracy [42] przede wszystkim istotna jest wiedza o oczekiwanym okresie opóźnienia czasowego $E(h)$, natomiast rozkład prawdopodobieństwa tej zmiennej losowej w mniejszym stopniu wpływa na uzyskane wyniki modelu. Dlatego też, w artykule skupiono się na przypadku, w którym parametr opóźnienia czasowego jest opisany rozkładem wykładniczym, a funkcja gęstości prawdopodobieństwa przyjmuje postać:

$$f_h(h) = \lambda e^{-\lambda h} \quad (5)$$

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

$$E_d(T) = \frac{kT \left[\frac{1}{T} \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \right] d_b + d}{T + d} \quad (6)$$

Podstawiając parametry systemu oraz formułę (5) do równania (6) otrzymujemy:

$$E_d(T) = \frac{(0,017155T) \left[\frac{1}{T} \int_0^T (T-h) \lambda e^{-\lambda h} dh \right] 6,5 + 2}{T + 2} \quad (7)$$

Uwzględniając w równaniu (7) średnią intensywność uszkodzeń λ (w analizowanym przypadku $\lambda = k = 0,017155$), otrzymano wykres przedstawiony na rys. 6. Dla badanego przypadku, optymalny okres między operacjami kontroli stanu obiektu wynosi 61 mth.

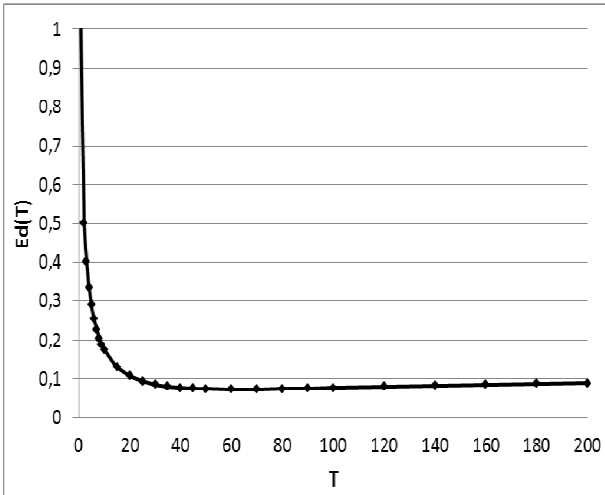
Następnie, podstawiając funkcję (1) oraz (5) do wzoru (3), oczekiwane koszty utrzymania wózków widłowych na jednostkę czasu w cyklu obsługiwanym można opisać wzorem:

$$C(T) = \frac{1}{(T + d)} \left\{ kT \left[c_{ir} + \frac{1}{T} (c_b + c_{ir}) \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \right] + c_i \right\} \quad (8)$$

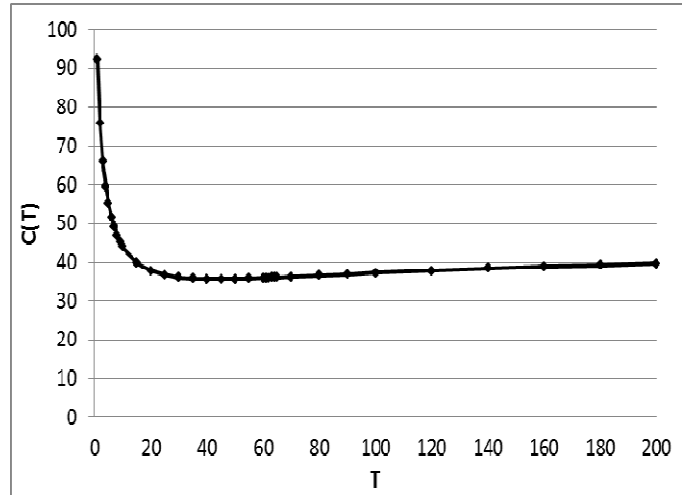
co pozwala na uzyskanie postaci:

$$C(T) = \frac{1}{(T + 2)} \left\{ 0,017155 \cdot T \left[1500 + \frac{1}{T} (2500 + 1500) \int_0^T (T-h) \lambda e^{-\lambda h} dh \right] + 250 \right\} \quad (9)$$

Na rys. 7 przedstawiono uzyskane wyniki ekonomiczne funkcjonowania badanego systemu. W analizowanym przypadku, optymalny okres T_{opt} wynosi 45 mth, przy całkowitych oczekiwanych kosztach utrzymania systemu na poziomie 1 602 PLN w cyklu obsługiwanym ($C(45)$ na poziomie równym 35,60 PLN). W przypadku pozostawienia optymalnego okresu T_{opt} na poziomie 61 mth (zgodnie z formułą (7)) – całkowite oczekiwane koszty utrzymania systemu wynosiły by ok 2 531 PLN w cyklu obsługiwanym, co daje nominalny wzrost o 929 PLN (koszty $C(61) = 35,88$ PLN).



Rys. 6. Funkcja $E_d(T)$ w sytuacji gdy parametr opóźnienia czasowego jest opisany rozkładem wykładniczym



Rys. 7. Funkcja $C(T)$ w sytuacji gdy parametr opóźnienia czasowego jest opisany rozkładem wykładniczym

4.4. Analiza wrażliwości modelu

W celu przeanalizowania wpływu zmiany parametrów modelu na poziom analizowanych funkcji $E_d(T)$ i $C(T)$ przeprowadzono analizę wrażliwości. W pierwszym kroku zbadano wpływ parametrów czasowych na poziom oczekiwanego czasu niezdatności funkcjonujących wózków widłowych. Jednym z parametrów, który może wpływać na uzyskane wyniki modelu jest średni czas operacji kontroli stanu systemu d . Wydłużenie czasu d wpływa na wydłużenie okresu T_{opt} oraz wyższy oczekiwany czas niezdatności systemu, jak przedstawiono w tabeli 4 oraz na rys. 8.

Drugim parametrem, którego wpływ na poziom funkcji $E_d(T)$ przeanalizowano, jest średni czas naprawy d_b . Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono w tabeli 5 oraz na rys. 9. Zgodnie z przewidywaniami, im krótszy średni czas naprawy systemu, tym dłuższy okres T_{opt} oraz niższy oczekiwany okres niezdatności. Podobny efekt uzyskujemy przy wydłużeniu średniego okresu między uszkodzeniami, jednakże w tym przypadku zmiany są prawie niezauważalne – wydłużenie MTBF o prawie 100% powoduje wydłużenie T_{opt} jedynie o 9 mth (Tabela 6).

Tabela 4. Analiza wrażliwości funkcji $E_d(T)$ na zmianę średniego czasu operacji kontroli stanu systemu d

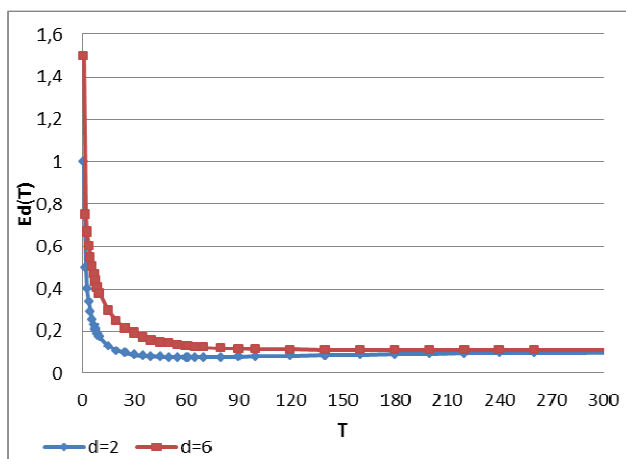
d [h]	T_{opt} [mth]	$E_d(T_{opt})$
1	40	0,055939
2	61	0,074431
3	80	0,086954
4	100	0,096334
5	140	0,103483
6	180	0,109056

Tabela 5. Analiza wrażliwości funkcji $E_d(T)$ na zmianę średniego czasu naprawy d_b

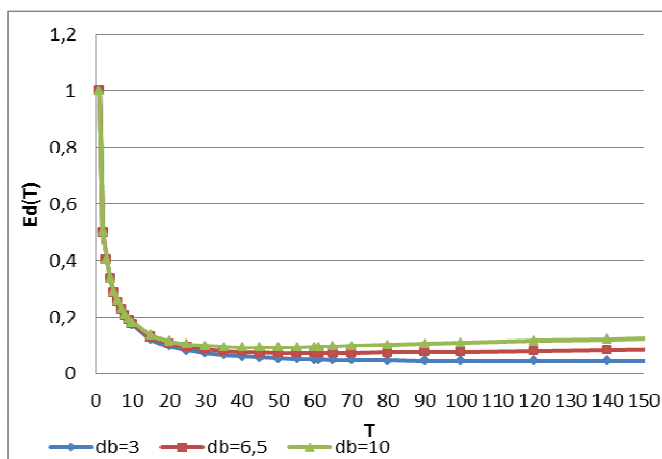
d_b [h]	T_{opt} [mth]	$E_d(T_{opt})$
3	120	0,046513
4	90	0,055834
5	80	0,063951
6	65	0,071084
6,5	61	0,074431
7	60	0,077679
8	52	0,083695
9	50	0,089396
10	45	0,094662

Tabela 6. Analiza wrażliwości funkcji $E_d(T)$ na zmianę średniego okresu między uszkodzeniami

MTBF [h]	T_{opt} [h]	$E_d(T_{opt})$
40	55	0,086446
45	58	0,082585
50	58	0,079197
58,29	61	0,074431
65	63	0,071165
70	64	0,069003
80	65	0,065251
100	70	0,059305



Rys. 8. Funkcja $E_d(T)$ przy zmianie średniego czasu operacji kontroli stanu systemu d



Rys. 9. Funkcja $E_d(T)$ przy zmianie średniego czasu naprawy d_b

W drugiej części analizy, zbadano wpływ parametrów ekonomicznych na poziom oczekiwanych kosztów utrzymania systemu w stanie zdatności w jednostce czasu $C(T)$. Ocenie poddano zmianę średniego kosztu c_i , średniego kosztu c_{ir} oraz średniego kosztu c_b .

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w tabeli 7 i na rys. 10, podniesienie średniego kosztu c_i do poziomu kosztu badań profilaktycznych dopuszczających wózki widłowe do eksploatacji, optymalny okres T_{opt} zwiększa się o 100% przy zmianie oczekiwanego kosztu utrzymania w jednostce czasu o ok. 5 PLN (i zmianie całkowitego oczekiwanego kosztu utrzymania w stanie zdatności systemu w cyklu obsługiwanym o ponad 2 000 PLN).

W przypadku oceny zmiany średniego kosztu c_{ir} , zgodnie z opinią ekspertów oczekuje się raczej obniżenia średniej wartości tego kosztu w długim horyzoncie czasu. A to z kolei będzie skutkowało skróceniem optymalnego okresu T_{opt} (tabela 8, rys. 11).

Ostatnim analizowanym parametrem jest średni koszt naprawy systemu c_b . W przypadku uszkodzeń wózków widłowych, wyróżnia się wymianę/naprawę takich elementów jak np. końcówki drążków, siłownik, lub komputer, gdzie koszty napraw znacznie przewyższają kwotę 2 500 PLN. Z drugiej strony występuje bardzo wiele napraw, nie przekraczających 1 000 PLN. Dlatego też, oceniono zmianę wielkości tego kosztu od - 500 PLN do + 1 000 PLN w stosunku do danej wyjściowej (tabela 9, rys. 12). Zgodnie z oczekiwaniami, im droższa jest operacja naprawy tym zalecane jest skrócenie okresu T . W przypadku wzrostu oczekiwanego kosztu naprawy do poziomu 3 500 PLN, zauważa się

skrócenie optymalnej długości okresu T_{opt} o 33%, co pozwoli na obniżenie całkowitych oczekiwanych kosztów utrzymania systemu w cyklu obsługiwanego do poziomu ok. 1 200 PLN przy oczekiwanym koszcie w jednostce czasu na poziomie 39,97 PLN (wzrost o 4,17 PLN/mth).

Tabela 7. Analiza wrażliwości funkcji $C(T)$ na zmianę średniego kosztu operacji kontroli stanu systemu c_i

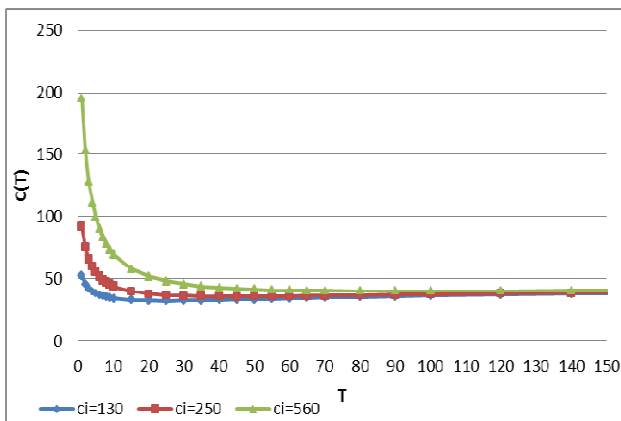
c_i [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utr} [PLN]
130	25	32,21	805,32
250	45	35,59	1601,77
400	70	38,24	2677,08
560	90	40,22	3619,85

Tabela 8. Analiza wrażliwości funkcji $C(T)$ na zmianę średniego kosztu operacji kontroli stanu systemu wraz z odnową c_{ir}

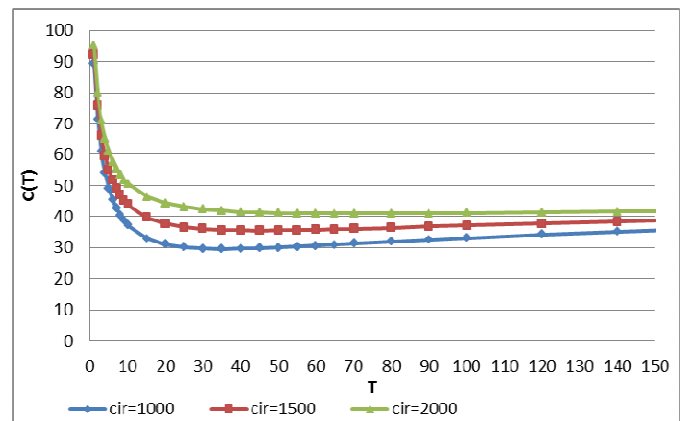
c_{ir} [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utr} [PLN]
1000	35	29,62	1036,88
1500	45	35,59	1601,78
2000	70	41,03	2871,84

Tabela 9. Analiza wrażliwości funkcji $C(T)$ na zmianę średniego kosztu naprawy systemu c_b

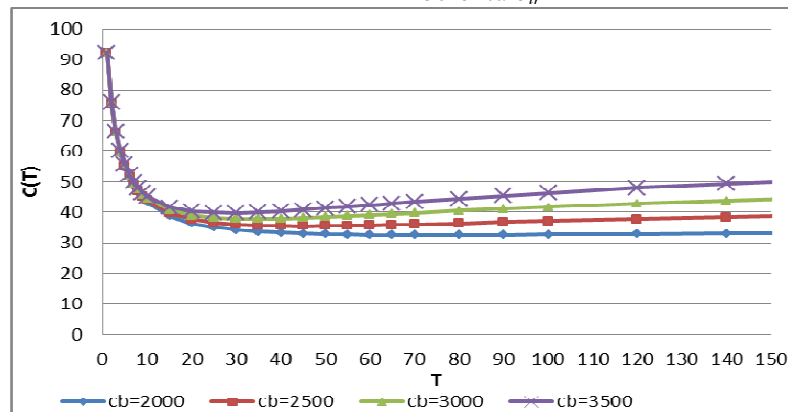
c_b [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utr} [PLN]
2000	70	32,54	2277,96
2500	45	35,59	1601,78
3000	35	37,88	1325,80
3500	30	39,78	1193,46



Rys. 10. Funkcja $C(T)$ przy zmianie średniego kosztu operacji kontroli stanu systemu c_i



Rys. 11. Funkcja $C(T)$ przy zmianie średnich kosztów naprawy w trakcie realizacji operacji kontroli stanu obiektu c_{ir}



Rys. 12. Funkcja $C(T)$ przy zmianie średnich kosztów naprawy obiektu c_b

5. Podsumowanie

Analiza i właściwy dobór strategii obsługi systemu wsparcia logistycznego jest jednym z ważniejszych aspektów poruszanych w literaturze. W analizowanym przypadku, brak niezawodnej realizacji zadań operacyjnych przez wózki widłowe uniemożliwił by poprawne funkcjonowanie zakładu metalurgicznego, co naraziło by przedsiębiorstwo na znaczne straty finansowe spowodowane m.in. przestojem produkcyjnym.

W analizowanym przypadku zastosowano algorytm doboru optymalnego okresu T_{opt} dla funkcjonowania wózków widłowych w wybranym systemie produkcyjnym. Przy przyjętych założeniach określono optymalną długość okresu T_{opt} na poziomie 61 mth przy uwzględnieniu kryterium oczekiwanego okresu niezdatności $E_d(T)$ oraz na poziomie 45 mth, gdy rozpatrywane jest kryterium ekonomiczne $C(T)$. Jednakże, brak danych uniemożliwił przeprowadzenie analizy optymalizacji okresu T z uwzględnieniem kryterium oczekiwanych kosztów konsekwencji niezdatności wózków widłowych. Dlatego też, w przyszłych kierunkach badawczych zakłada się poszerzenie przedstawionej analizy o trzeci proces oceny, po zgromadzeniu niezbędnych danych eksploatacyjno-ekonomicznych.

Jednocześnie w analizowanym przypadku, optymalna długość okresu T_{opt} , równa 61 mth, przy założeniu tryzmiarowej pracy w systemie oraz przepracowaniu średnio 7 mth na zmianę, oznacza iż okres inspekcji w przybliżeniu wynosi 3 dni. Przy uwzględnieniu warunków użytkowania wózków widłowych, ta aproksymacja wydaje się być wiarygodna.

W artykule skupiono się na przedstawieniu możliwości zastosowania koncepcji opóźnień czasowych w celu określenia optymalnego okresu między obsługami obejmującymi kontrolę stanu zdatności obiektów technicznych. Zaproponowana metodyka postępowania może być wsparciem dla managerów w procesie decyzyjnym obejmującym określenie prawidłowego okresu eksploatacji obiektów technicznych. Artykuł jest kontynuacją prac nad zagadnieniem związanym z modelowaniem opóźnień czasowych dla systemów wieloelementowych, przedstawionych m.in. w pracach [20, 30, 31, 38]. W swoich pracach, w kolejnych krokach, autorzy skupią się na określeniu możliwości zastosowania modeli opóźnień czasowych do oceny funkcjonowania rzeczywistych systemów technicznych (np. uwzględnienie nieperfekcyjnych operacji diagnozowania stanu systemu), czy opracowania modeli matematycznych dla systemów wieloelementowych z opóźnieniem czasowym. Pozwoli to na określenie podstawowych zasad doboru polityki obsługi profilaktycznej z punktu widzenia osoby zarządzającej eksploatacją systemu technicznego.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować recenzentowi za cenne uwagi, które pomogły udoskonalić artykuł.

References

1. 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.
2. Alzubaidi H. J. Maintenance modelling of a major hospital complex. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1993.
3. Ascher H. E., Kobbacy K. A. H. Modelling preventive maintenance for deteriorating repairable systems. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1995; 6: 85-99.
4. Attia A. F. Estimation of the reliability function using the delay-time models. *Microelectronics Reliability* 1997; 37(2): 323-327.
5. Aven T., Dekker, R. A useful framework for optimal replacement models. *Reliability Engineering and System Safety* 1997; 58(1): 61-67.
6. Babiarz B. An introduction to the assessment of reliability of the heat supply systems. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2006; 83(4): 230-235.
7. Bajda A., Wrażeń M., Laskowski D. Diagnostics the quality of data transfer in the management of crisis situation. *Electrical Review* 2011; 87(9A): 72-78.
8. 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.
9. Baker R. D., Wang W. Estimating the delay-time distribution of faults in repairable machinery from failure data. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1992; 3: 259-281.
10. Bartezzaghi E., Spina G., Verganti R. Lead-time models of business processes. *International Journal of Operations and Production Management* 1994; 14(5): 5-20.
11. Beamon B. M. Supply chain Design and Analysis: Models and Methods. *International Journal of Production Economics* 1998; 55(3): 281-294.
12. Blanchard B. S. Logistics engineering and management. Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, 2004.
13. Blanchard B. S. Logistics Requirements: Established From The Beginning. *SOLETech* 2002; 5.1: 1-6.
14. Cai J., Zhu L. A delay-time model with imperfect inspection for aircraft structure subject to a finite time horizon. *Proc. of IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services* 2011. 15-8 Sept. 2011, Nanjing, China.
15. Catuneanu V. M., Moldovan C., Popentin, Fl., Gheorghin M. Optimum system availability and spare allocation. *Microelectronic Reliability* 1988; 28(3): 353-357.
16. Cerone P. On a simplified delay time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring. *Journal of the Operational Research Society* 1991; 42(6): 505-511.

17. Chaberek M. Makro- i mikroekonomiczne aspekty wsparcia logistycznego. Wyd. U.G.: Gdańsk, 2002.
18. Cho I. D., Parlar M. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research* 1991; 51: 1-23.
19. Choi K-M. Semi-Markov and Delay Time Models of Maintenance. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1997.
20. Christer A. H. A Review of Delay Time Analysis for Modelling Plant Maintenance. in: *Stochastic Models in Reliability and Maintenance*, Osaki S. (ed.), Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
21. Christer A. H. Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 1999; 50: 1120-1137.
22. Christer A. H. Delay-time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring. *Journal of the Operational Research Society* 1987; 38(4): 329-334.
23. Christer A. H. Modelling inspection policies for building maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 1982; 33: 723-732.
24. Christer A. H., Redmond D. F. Revising models of maintenance and inspection. *International Journal of Production Economics* 1992; 24: 227-234.
25. 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.
26. Christer A. H., Scarf P. A. A robust replacement model with applications to medical equipment. *Journal of the Operational Research Society* 1994; 45(3): 261-275.
27. Christer A. H., Waller W. M. A Descriptive model of capital plant replacement, *Journal of the Operational Research Society* 1987; 38(6): 473-477.
28. Christer A. H., Waller W. M. An operational research approach to planned maintenance: modelling P.M. for a vehicle fleet. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(11): 967-984.
29. Christer A. H., Waller W. M. Reducing production downtime using delay-time analysis. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(6): 499-512.
30. Christer A. H., Waller W. M. Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(5): 401-406.
31. Christer A.H., Wang W., Choi K., Van der Duyn Schouten F. A. The robustness of the semi-Markov and delay time single-component inspection models to the Markov assumption. *IMA Journal of Management Mathematics* 2001; 12: 75-88.
32. Christer A. H., Whitelaw J. An operational research approach to breakdown maintenance: problem recognition. *Journal of the Operational Research Society* 1983; 34(11): 1041-1052.
33. Cunningham A., Wang W., Zio E., Allanson D., Wall A., Wang J. Application of Delay-time Analysis via Monte Carlo Simulation. *Journal of Marine Engineering and Technology* 2011; 10(3): 57-72.

34. Dekker R., Roelvink I. F. K. Marginal cost criteria for preventive replacement of a group of components. *European Journal of Operational Research* 1995; 84: 467-480.
35. 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.
36. Frostig E. Comparison of maintenance policies with monotone failure rate distributions. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 2003; 19: 51-65.
37. Gross D., Pinkus C. E. Designing a support system for repairable items. *Computers & Operations Research* 1979; 6: 59-68.
38. 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.
39. <http://sjp.pwn.pl/sjp/motogodzina;2484786> (dostęp: 15.12.2014r.).
40. Jardine A. K. S., Hassounah M. I. An optimal vehicle-fleet inspection schedule. *Journal of the Operational Research Society* 1990; 41(9): 791-799.
41. Jia X., Christer A. H. A periodic testing model for a preparedness system with a defective state. *IMA Journal of Management Mathematics* 2002; 13: 39-49.
42. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Analysis of maintenance models' parameters estimation for technical systems with delay time. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2014; 16(2): 288-294.
43. 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.*
44. 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.*
45. Jones B., Jenkinson I., Wang J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. *Reliability Engineering and System Safety* 2009; 94: 111-124.
46. Kierzkowski A. Reliability models of transportation system of low cost airlines. In: *Reliability, risk and safety: back to the future.* Ale B. J. M., Papazoglou J. A., Zio E., Raton, B (eds). CRC Press: London 2010.
47. Kierzkowski A., Kowalski M., Magott J., Nowakowski T. Maintenance process optimization for low-cost airlines. *Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.*
48. Lee C. Applications of delay time theory to maintenance practice of complex plant. PhD work. T.I.M.E. Research Institute. Salford: University of Salford, 1999.
49. Leung F., Kit-leung M. Using delay-time analysis to study the maintenance problem of gearboxes. *International Journal of Operations & Production Management* 1996; 16(12): 98-105.
50. Lewitowicz J. Ryzyko w logistyce. *Logistyka* 2007; 5: 1-6.

51. Melo M. T., Nikel S., Saldanha da Gama F. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers & Operations Research* 2005; 33(1): 181-208.
52. Młyńczak M., Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S. Klasyfikacja modeli utrzymania systemów technicznych. W: *Problemy utrzymania systemów technicznych*. Siergiejczyk M. (red.) Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014.
53. Nakagawa T. A summary of discrete replacement policies. *European Journal of Operational Research* 1984; 17: 382-392.
54. Nicolai R. P., Dekker R. A review of multi-component maintenance models. *Proc. of European Safety and Reliability Conference ESREL 2007*, eds. Aven, T. & Vinnem, J.E., Leiden: CRC Press/Balkema: 289-296.
55. Nicolai R. P., Dekker R. Optimal maintenance of multicomponent systems: a review. *Economic Institute Report* 2006.
56. Nowakowski T. Analysis of modern trends of logistics technology development. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011; 11(3): 699-706.
57. Nowakowski T. Problems with analyzing operational data uncertainty. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010; 10(3): 95-109.
58. Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S. Developments of time dependencies modeling concepts, *Advances in safety, reliability and risk management*. *Proc. of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011*, Troyes, France, 18-22 September 2011. Leiden: CRC Press/Balkema: 832-838.
59. Nowakowski T., Werbińska S. On problems of multicomponent system maintenance modeling. *International Journal of Automation and Computing* 2009; 6(4): 364-378.
60. Nowakowski T., Werbińska S. Wybrane problemy oceny łańcucha logistycznego. W: *Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej*. Bukowski L. (red). Kraków: Wydawnictwo AGH, 2009.
61. Pham H., Wang H. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research* 1996; 94: 425-438.
62. Pierskalla W. P., Voelker J. A. A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems. *Naval Research Logistics Quarterly* 1976; 23: 353-388.
63. Pillay A., Wang J., Wall A. D., Ruxton T. A maintenance study of fishing vessel equipment using delay-time analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 2001; 7(2): 118-127.
64. Redmond D. F. *Delay Time Analysis in Maintenance*. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1997.
65. Restel F. J. Train punctuality model for a selected part of railway transportation system. *Proc. of 22nd Annual Conference on European Safety and Reliability ESREL 2013*. 29 September-02 October 2013, Amsterdam, the Netherlands, 2014.
66. Sarkar J. Li F. Limiting average availability of a system supported by several spares and several repair facilities. *Statistics and Probability Letters* 2006; 76: 1965-1974.

67. Scarf P. A. On the application of mathematical models in maintenance. *European Journal of Operational Research* 1997; 99: 493-506.
68. Scarf P. A., Bouamra O. On the application of a capital replacement model for a mixed fleet. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1995; 6: 39-52.
69. Sherif Y. S. Reliability analysis: Optimal inspection & maintenance schedules of failing equipment. *Microelectronics and Reliability* 1982; 22(1): 59-115.
70. Subramanian R., Natarajan R. An n-unit standby redundant system with r repair facilities and preventive maintenance. *Microelectronics Reliability* 1982; 22(3): 367-377.
71. Thomas L. C. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering* 1986; 16: 297-309.
72. Tomaszek H., Jaształ M., Zieja M. Application of the Paris formula with $M=2$ and the variable load spectrum to a simplified method for evaluation of reliability and fatigue life demonstrated by aircraft components. *Eksploracja i Niezawodność-Maintenance and Reliability* 2013; 15(4): 297-303.
73. Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorcze technicznym (Dz.U. z 2013, poz. 963 z późn. zm.).
74. Valdez-Flores C., Feldman R. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics* 1989; 36: 419-446.
75. Valis D., Koucky M., Zak L. On approaches for non-direct determination of system deterioration. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2012; 14(1): 33-41.
76. Valis D., Zak L., Pokora O. Engine residual technical life estimation based on tribo data. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(2): 203-210.
77. Wang H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research* 2002; 139: 469-489.
78. Wang W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modeling. *Reliability Engineering and System Safety* 2012; 106: 165-178.
79. Wang W. Modeling planned maintenance with non-homogeneous defect arrivals and variable probability of defect identification. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2010; 2: 73-78.
80. Wang W. Delay time modelling for optimized inspection intervals of production plant. In: *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., Ait-Kadi, D. (eds.). London: Springer, 2009.
81. Wang W. Delay time modelling. In: *Complex system maintenance handbook*. Kobbacy, A. H., Prabhakar Murthy, D. N. (eds.). London: Springer, 2008.
82. Wang W. A delay time based approach for risk analysis of maintenance activities. *Journal of the Safety and Reliability Society* 2003; 23(1): 103-113.
83. Wang W., Christer A. H. Solution algorithms for a nonhomogeneous multi-component inspection model. *Computers & Operations Research* 2003; 30: 19-34.

84. Wang W., Christer A. H. A modelling procedure to optimize component safety inspection over a finite time horizon. *International Quality and Reliability Engineering* 1997; 13: 217-224.
85. Wen-yua LV, Wang W. Modelling preventive maintenance of production plant given estimated PM data and actual failure times. *Proc. of International Conference on Management Science and Engineering* 2006, 5-7 October 2006, Lille.
86. Werbińska-Wojciechowska S. Problems of logistics systems modelling with the use of DTA approach. *Logistics and Transport* 2012; 2: 63-74.
87. Werbińska-Wojciechowska S. Modelowanie zależności czasowych w systemach produkcyjnych. *Logistyka* 2010; 2: 1-10.
88. Werbińska S. Model logistycznego wsparcia systemu eksploatacji środków transportu. Wrocław: Rozprawa doktorska Wydziału Mechanicznego PWr., 2008.
89. Werbińska S. Model niezawodności systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową. *Logistyka* 2007; 3: 1-12.
90. Witkowski K., Kiba-Janiak M., Seniuk S. Map of Logistics processes as a part of creating an enterprise supply chain in the metallurgical company. *Proc. of 21st International Conference on Metallurgy and Materials*, 23-25 May, 2012, Brno Czech Republic.
91. www.cscmp.org (dostęp: 20.10.2014r.).
92. www.eksploatacja.waw.pl/index.php.php?s=4000 (dostęp: 20.10.2014r.).
93. Zajac M., Kierzkowski A. Uncertainty assessment in semi Markov methods for Weibull functions distributions. In: *Advances in Safety, Reliability and Risk Management – Proc. of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011*. 18-22 September 2011, Troyes France.
94. Zhao J., Chan A. H. C., Roberts C., Madelin K. B. Reliability evaluation and optimisation of imperfect inspections for a component with multi-defects. *Reliability Engineering and Systems Safety* 2007; 92: 65-73.