

Mateusz ZAJĄC

Politechnika Wrocławska

David VALIS

Wyższa Szkoła Obrony, Brno

PRZYKŁAD OCENY RYZYKA SYSTEMU PRZEŁADUNKU KONTENERÓW

Słowa kluczowe

Analiza ryzyka, terminal kontenerowy.

Streszczenie

Artykuł stanowi dyskusję nad sposobem przeprowadzania analizy ryzyka dla systemu przeładunku kontenerów. W omawianym przypadku szczególne znaczenie ma fakt niepełnej wiedzy o elementach systemu. Dalsze prace nad problemem oszacowania ryzyka w warunkach niepełnej wiedzy zostały przedstawione w zakończeniu artykułu.

Wprowadzenie

Transport kontenerowy jest na świecie popularnym sposobem przewozu ładunków. Nawet podczas globalnego kryzysu wolumen przewozu w tych jednostkach ładunkowych wciąż się powiększa (w Polsce w 2008 roku wzrósł ponad 5%). Przemieszczanie ładunku należy do łańcucha logistycznego, gdzie jednym z istotnych czynników jest niezawodność [2]. Modele niezawodności transportu intermodalnego (szczególnego przypadku transportu kontenerów) był przedstawiany podczas konferencji Zimowa Szkoła Niezawodności, ESREL, KONBiN [3–5]. Modele te bazowały na procesach Markowa i semi-markowskich, dzieląc stany eksploatacyjne na stany zdatności i niezdatności [6]. Jed-

nak kwestia niezawodności jest także rozważana z punktu widzenia oceny ryzyka. Artykuł zawiera podstawową ocenę ryzyka systemu przeładunku na terminalu kontenerowym w warunkach ograniczenia danych.

1. Założenia oceny ryzyka

W ogólnym pojęciu „ryzyko to zjawisko, które może negatywnie oddziaływać na system”. W rozpatrywanym przypadku założono, że negatywnym skutkiem ryzyka jest zmniejszanie zdolności przeładunkowych na terminalu kontenerowym; w wyniku negatywnych okoliczności system nie jest zdolny obsłużyć wszystkich przybywających do obsługi kontenerów. Założono, że obniżone zdolności przeładunkowe na terminalu są wynikiem uszkodzenia lub braku dostępności urządzenia przeładunkowego. Oczywiście problemy w przeładunkach mogą być spowodowane innymi przyczynami, takimi jak zła pogoda lub błędy w podejmowaniu decyzji itd.

Ocena ryzyka w omawianym przypadku sprowadza się do znalezienia trzech czynników – składników ryzyka:

- prawdopodobieństwa występowania – v_{oi} ,
- wpływu na poprawną pracę terminalu kontenerowego V_i ,
- prawdopodobieństwa wykrycia wadliwego elementu przed ujawnieniem się negatywnych skutków v_d .

Każdy z czynników musi być wyznaczony dla i -tego elementu systemu. Przygotowując analizę ryzyka, powinien być znany charakter uszkodzenia. Jako niewystarczającą uważa się informację mówiącą wyłącznie o braku możliwości korzystania z maszyny; przy analizie ryzyka ważne są również takie dane jak chwila uszkodzenia, czas naprawy, prawdopodobieństwo występowania itd. Dla każdej maszyny można przygotowywać informacje takie, jak podano w tabeli 1.

Tabela 1. Poszukiwane dane dla maszyn

Lp.	Uszkodzony element	Prawdopodobieństwo występowania	Czas naprawy	Prawdopodobieństwo wcześniejszego wykrycia
1	element 1	p_1	t_1	p_{d1}
2	element 2	p_2	t_2	p_{d2}
..
n		p_n	t_n	p_{dn}

W przypadku systemu przeładunkowego wielkość skutku uszkodzenia może być oznaczana liczbą określoną w skali zgodnie z interwałami wyznaczonymi przez liczbę nie przeładowanych kontenerów. Przy oszacowaniu prawdopodobieństwa występowania stanu niezdatności, oprócz numerycznych wartości określających intensywność uszkodzeń, warto również rozważać warunki eksploatacji, takie jak środowisko, uwarunkowania mechaniczne i elektryczne mo-

gące wpływać na zwiększenie prawdopodobieństwa występowania uszkodzenia. Prawdopodobieństwo występowania stanu niezdatności w omawianym przypadku może być określone przez [7]:

- wyniki testów niezawodnościowych maszyn,
- wyniki testów niezawodnościowych komponentów maszyn.

Prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia przed jego zaistnieniem może być, podobnie jak wartość wpływu uszkodzenia, określone przez skalę zgodnie z interwałami przedstawionymi w tabeli 2. Wartości te zostały opracowane na podstawie opinii ekspertów.

Jedną z metod ilościowego określenia poziomu ryzyka jest tzw. *Risk Priority Number* (RPN) [7], współczynnik, który można obliczyć zgodnie ze wzorem

$$RPN_i = v_{oi} \cdot V_i \cdot v_d \quad (1)$$

gdzie: v_{oi} – wartość prawdopodobieństwa występowania,

V_i – wielkość skutków,

v_d – prawdopodobieństwo wcześniejszego ujawnienia uszkodzenia.

Otrzymane wartości są porównywane zgodnie ze skalą, która uporządkowuje zdarzenia negatywnie oddziałujące na system lub element systemu. Problematyka metody sprowadza się do określenia odpowiednich progów poziomu ryzyka. Poziom ryzyka akceptowalnego może być różnie rozumiany, np. poprzez straty finansowe, jakie poniesie przedsiębiorstwo w wyniku utraty zdolności operacyjnej. Składnikami tych strat są:

- zmniejszone wpływy spowodowane zmniejszeniem liczby przeładunków kontenerów,
- kara, którą musi wypłacić terminal w wyniku niedotrzymania warunków dostawy ładunków, koszt napraw,
- przy długotrwałych naprawach koszt wynajmu urządzeń zastępczych.

Progi mogą być wyznaczane również z technicznego punktu widzenia. Zazwyczaj systemy mechaniczne są tak przygotowywane, aby pracować z obciążeniem nie większym niż 80%. Większy poziom wykorzystania maszyn (nawet 100%) jest możliwy, konstrukcyjnie bezpieczny, jednak praktyka eksploatacyjna niejednokrotnie wykazała, że permanentne pełne wykorzystanie możliwości urządzeń powoduje skłócenie czasu jej eksploatacji. Urządzenia wykonujące przeładunki kontenerów (suwnice lub wozy kontenerowe) są przygotowywane do obsługi ładunków o masie 40 ton, jednak najcięższe kontenery wraz z pełnym obciążeniem ważą nie więcej niż 35 ton, a dopuszczalna masa całkowita najczęściej stosowanych kontenerów wynosi 32 tony, 80% zdolności przeładunkowych typowej suwnicy kontenerowej. Zdolność przeładunkową urządzenia można wyznaczyć ze wzoru [1]:

$$W = \frac{\beta \cdot T}{t_c} \quad (2)$$

gdzie: T – dzienny czas otwarcia terminalu [min],

t_c – czas jednego cyklu przeładunkowego [min],

β – współczynnik efektywnego czasu pracy urządzenia.

3. Przykład

3.1. Charakterystyka systemu przeładunkowego

System składa się z czterech urządzeń przeładunkowych obsługujących ładunki kontenerowe. Terminal jest otwarty 12 h dziennie. Zdolności przeładunkowe każdej maszyny obliczono zgodnie ze wzorem (2) i przedstawiono je w tabeli 2. System może wykonać 184 ruchy dziennie, dziennie trafia do obsługi 150 kontenerów. Zmniejszenie zdolności przeładunkowych o 20% powoduje brak możliwości obsługi 37 kontenerów. Właściciel terminalu ocenił, że zmniejszenie zdolności przeładunkowych o 45 kontenerów może spowodować negatywne skutki, w ten sposób określił poziom akceptowalnego ryzyka. Ta wartość została użyta do określenia skali skutków wystąpienia ryzyka. Zamieszczono ją w tabeli 3.

Jedną z kwestii w omawianym przykładzie jest określenie prawdopodobieństwa zdolności wcześniejszego odkrycia uszkodzonego elementu maszyny. Zgodnie ze wzorem (1), aby obliczyć wartość RPN, musi być znane to prawdopodobieństwo. Ten czynnik także może być określony w skali. Podczas zbierania danych nie uzyskano informacji o prawdopodobieństwie wcześniejszego wykrycia uszkodzeń, stąd przyjęto założenie o wartości czynnika.

Tabela 2. Zdolności przeładunkowe maszyn

	Suwnica 1	Suwnica 2	Suwnica 3	Suwnica 4
t_c [min]	9	9	12	15
T [min]	720	720	720	720
β	0,64	0,71	0,73	0,72
zdolność przeładunkowa [kont.]	51,2 = 51	56,8 = 56	43,8 = 43	34,56 = 34

Skala zdolności wcześniejszego wykrycia uszkodzenia może być czterostopniowa, podobnie jak wcześniejsze skale. Poziom „1” będą posiadać te uszkodzenia, których wykrycie jest bardzo proste, „4” uszkodzenia, których nie można wcześniej wykryć. Średnia wielkość pomiędzy 1 i 4 wynosi 2,5. Tę wartość wykorzystano do dalszych obliczeń.

Tabela 3. Skala skutków wystąpienia ryzyka

Wpływ	Liczba nieprzeładowanych kontenerów	Wartość
niewielki	0–45	1
duży	46–90	2
krytyczny	91–135	3
katastrofalny	136–	4

Skala skutków uszkodzenia ma wpływ na wielkość progów RPN. Założono następujące progi:

- 1) zdolność przeładunkowa obniżona o mniej niż 20% (zdolność przeładunkowa większa niż 147 kontenerów),
- 2) zdolność przeładunkowa obniżona o 21–40% (zdolność przeładunkowa 109–146 kontenerów),
- 3) zdolność przeładunkowa obniżona o 41–60% (zdolność przeładunkowa 72–108 kontenerów),
- 4) zdolność przeładunkowa obniżona o więcej niż 60% (zdolność przeładunkowa mniejsza niż 72 kontenery).

Na tej podstawie można obliczyć, o ile zmniejszą się wpływy terminalu przy zmniejszeniu zdolności przeładunkowej o 1%. Łączna zdolność przeładunkowa wynosi 184 kontenery dziennie, stąd 1% to 1,84 kontenera. Jednostkowy przeładunek na terminalu kosztuje 24 EUR, więc 1% jest wart $1,84 \times 24 \text{ EUR} = 44,16 \text{ EUR}$. Z finansowego punktu widzenia progi można określić następująco:

- 1) wpływy pomniejszone o nie więcej niż $20 \times 44,16 \text{ EUR} = 883,2 \sim 883 \text{ EUR}$,
- 2) wpływy mniejsze o 883 – 1760 EUR,
- 3) wpływy mniejsze o 1760 – 2650 EUR,
- 4) wpływy mniejsze o więcej niż 2650 EUR.

Na tej podstawie władze terminalu określiły akceptowalny poziom ryzyka, na który składa się:

- prawdopodobieństwo uszkodzenia maszyny przeładunkowej – 0,04,
- wartość wcześniejszego odnalezienia uszkodzenia 2,5,
- zmniejszenie wpływów nie większe niż 883 EUR, więc zmniejszenie zdolności przeładunku o mniej niż 20%.

Na tej podstawie korzystając ze wzoru (1) wyliczony współczynnik RPN wynosi 0,1.

Jako zupełnie nieakceptowany poziom RPN określono taki, gdy:

- prawdopodobieństwo uszkodzenia maszyny przeładunkowej – 0,1,
- wartość wcześniejszego odnalezienia uszkodzenia 2,5,
- wpływ skutków uszkodzenia osiąga wartość 4.

Stąd wartość RPN wynosi 1.

W tabeli 4 przedstawiono wartość współczynnika RPN, w przypadku gdy każda z maszyn ulegnie uszkodzeniu, a pozostałe będą nadal w stanie zdatności. Jak widać, największą wartość RPN uzyskuje się w przypadku uszkodzenia maszyny numer 3, dla której wartość ta wynosi 0,2. Nawet w przypadku uszkodzenia maszyny najbardziej efektywnej (numer 2) lub najwolniejszej (numer 4) wartość RPN utrzymuje się na akceptowalnym poziomie równym 0,1. Wartość RPN będzie się zwiększać w przypadku jednoczesnego uszkodzenia kilku maszyn.

Tabela 4. Wartości RPN dla jednej uszkodzonej suwnicy

	Suwnica 1	Suwnica 2	Suwnica 3	Suwnica 4
Zdolność przeładunkowa maszyny	51	56	43	34
Zdolność przeładunkowa systemu	133	128	141	150
Wartość skutku	2	2	2	1
Prawdopodobieństwo uszkodzenia	0,02	0,02	0,04	0,04
RPN	0,1	0,1	0,2	0,1

3.2. Scenariusze

Każda maszyna może się uszkadzać kolejno albo wszystkie w tej samej chwili. Przyjęto, że czas naprawy maszyny 1 i 2 trwa dokładnie 3 dni, maszyn 3 i 4 – 2 dni. Kiedy nastąpi uszkodzenie maszyn, straty terminalu wynikają z tego, która z maszyn jest uszkodzona oraz czasu jej naprawy. Wówczas zdolność przeładunkowa będzie się zmieniać każdego dnia, konsekwentnie również wartość RPN obliczana dla systemu. Znaczenie ma również kolejność uszkadzania się maszyn.

Istnieje 30 kombinacji, w których w stan niezdatności przejdą dwie maszyny. Kiedy uszkodzą się trzy, jest już 208 różnych scenariuszy.

W najgorszym przypadku mogą uszkodzić się wszystkie maszyny, jednak mogą też ulegać uszkodzeniom jedna po drugiej. Sytuację, kiedy czas zakłóceń pracy systemu jest najdłuższy, przedstawiono w tabeli 5.

Jak widać, wartość współczynnika RPN zmienia się w kolejnych dniach. Najwyższa wartość jest osiągana piątego dnia (0,45), podczas gdy najniższa i akceptowalna wartość jest dnia pierwszego, drugiego i siódmego (0,1). W ciągu tych dni terminal będzie miał zmniejszone wpływy finansowe z tytułu niewykonanych operacji przeładunkowych o 5700 EUR. Warto zauważyć, że pomimo uszkadzania kolejnych maszyn przez 4 dni wartość RPN utrzymuje się na akceptowanym poziomie.

Kolejny scenariusz przedstawiono w tabeli 6. Cztery maszyny uszkadzają się jedna po drugiej. W tym przypadku najmniejsza zdolność przeładunkowa

występuje trzeciego dnia, zaledwie 34 kontenery. Tego dnia RPN osiąga wartość 0,6. Wpływy finansowe zostają pomniejszone o 7320 EUR.

Tabela 5. Scenariusz najdłuższych zakłóceń pracy systemu

Suwnica 1	51	51	51				
Suwnica 2			56	56	56		
Suwnica 3					43	43	
Suwnica 4						34	34
Dzień zakłóceń	1	2	3	4	5	6	7
Zmniejszenie zdolności przeładunkowej	51	51	107	56	99	77	34
Wartość skutków	2	2	3	2	3	2	1
prawdopodobieństwo 1	0,02	0,02	0,02	0	0	0	0
prawdopodobieństwo 2	0	0	0,02	0,02	0,02	0	0
prawdopodobieństwo 3	0	0	0	0	0,04	0,04	0
prawdopodobieństwo 4	0	0	0	0	0	0,04	0,04
RPN	0,1	0,1	0,3	0,1	0,45	0,4	0,1
Straty [EUR]*	408	408	1752	528	1560	1032	0
Całkowite Straty [EUR]*	408	816	2568	3096	4656	5688	5688

* – założono koszt przeładunku 24 EUR, straty rozumiane jako zmniejszenie wpływów.

Najtrudniejszy dla systemu scenariusz przedstawiono w tabeli 7. Uszkodzeniu ulegają wszystkie maszyny w tej samej chwili. W tym wypadku RPN jest największy w porównaniu z wcześniej zaprezentowanymi scenariuszami – najniższa wartość 0,8, największa 1,2, RPN przekracza akceptowalną wartość. Wartość elementu określającego skutki uszkodzeń zakłóceń pracy systemu osiąga największą możliwą wartość – 4. Terminal w wyniku zakłóceń zmniejsza swoje wpływy o prawie 9000 EUR.

Tabela 6. Scenariusz pięciodniowych zakłóceń pracy systemu – w. I

Suwnica 1	51	51	51		
Suwnica 2		56	56	56	
Suwnica 3			43	43	
Suwnica 4				34	34
Dzień zakłóceń	1	2	3	4	5
Zmniejszenie zdolności przeładunkowej	51	107	150	133	34
Wartość skutków	2	2	3	3	1
prawdopodobieństwo 1	0,02	0,02	0,02	0	0
prawdopodobieństwo 2	0	0,02	0,02	0,02	0,02
prawdopodobieństwo 3	0	0	0,04	0,04	0,04
prawdopodobieństwo 4	0	0	0	0,04	0,04
RPN	0,1	0,2	0,6	0,75	0,25
Straty [EUR]*	408	1752	2784	2376	0
Całkowite Straty [EUR]*	408	2160	4944	7320	7320

* - założono koszt przeładunku 24 EUR, straty są tu zmniejszeniem wpływów.

Tabela 7. Scenariusz całkowitego wyłączenia pracy systemu

Suwnica 1	51	51	51
Suwnica 2	56	56	56
Suwnica 3		43	43
Suwnica 4	34	34	
Dzień zakłóceń	1	2	3
Zmniejszenie zdolności przeładunkowej	141	184	150
Wartość skutków	4	4	4
prawdopodobieństwo 1	0,02	0,02	0,02
prawdopodobieństwo 2	0,02	0,02	0,02
prawdopodobieństwo 3	0	0,04	0,04
prawdopodobieństwo 4	0,04	0,04	0
RPN	0,8	1,2	0,8
Straty [EUR]*	2568	3600	2784
Całkowite Straty [EUR]*	2568	6168	8952

* - założono koszt przeładunku 24 EUR, straty rozumiane jako zmniejszenie wpływów.

W artykule zaprezentowano najbardziej niekorzystne scenariusze. Jak widać, w zależności od sekwencji uszkodzeń zmienia się wartość RPN, ale również skutki uszkodzeń maszyn dla systemu mogą się różnić. Przejście w stan niezdatności wszystkich maszyn sprawia, że zakłócenia pracy systemu przeładunkowego są krótsze, ale wartość RPN oraz ewentualne straty finansowe większe. Jednak tego typu sytuacja jest mało prawdopodobna. Prawdopodobieństwo uszkodzenia się dwóch urządzeń przeładunkowych w tej samej chwili wynosi 0,0104, trzech 0,000576, więc uszkodzenie wszystkich maszyn jest praktycznie pomijalnie małe.

Podsumowanie

W zaprezentowanym przykładzie analizy systemu przeładunkowego okazało się, że dłuższy czas trwania zakłóceń pracy systemu powoduje mniejsze skutki pozostawania poszczególnych maszyn w stanie niezdatności, a w konsekwencji mniejsze wartości RPN. W wypadku zakłóceń siedmiodniowych maksymalna wartość RPN wynosi 0,45, przy trzydniowych zakłóceniach RPN jest znacznie większy – 1,2. Mniejsze skutki zakłóceń systemu są możliwe, kiedy urządzenia przechodzą w stan niezdatności w kolejności, nie jednocześnie.

Artykuł pokazuje fundamentalną analizę i ocenę ryzyka systemu przeładunku kontenerów w przypadku ograniczonych informacji. Nie podjęto próby oszacowania ryzyka wynikającego z innych przyczyn, takich jak błędy kierownicze, wpływ warunków atmosferycznych itd. Nie określono podstawowych działań mających na celu uniknięcie sytuacji podwyższonego ryzyka lub działania, kie-

dy poziom akceptowalnego ryzyka zostanie przekroczony. Skupiono uwagę wyłącznie na ewentualnych problemach wynikających z przechodzenia w stan niezdatności maszyn przeładunkowych. Przeprowadzenie pełnej analizy nie było możliwe z powodu udostępnienia autorom ograniczonych informacji. W przyszłej pracy zostaną doprecyzowane kwestie możliwych uszkodzeń każdej z maszyn przeładunkowych, charakter uszkodzeń, prawdopodobieństwo wystąpienia wraz z jego rozkładem.

Bibliografia

1. Jakubowski L.: Technologie przeładunku. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2003.
2. Nowakowski T.: Problemy oceny niezawodności systemów logistycznych. XXXV Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2007.
3. Nowakowski T.: Reliability Model of Combined Transportation System. Proceedings of conference ESREL 2004, Berlin.
4. Zając M.: Application of five-phases model of reliability of combined transportation system. ESREL 2006, Lisbona 2006.
5. Zając M.: Analysis of five-phases model of reliability of intermodal transportation. Jurnal of KONBiN, Krakow 2006.
6. Zając M.: Modelowanie gotowości systemu transportu intermodalnego z zastosowaniem procesów semi-markowskich. XXXV Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2007.
7. IEC 60812 ed. 2: Analysis technique for system reliability – Procedure for failure mode and effect analysis (FMEA).

Recenzent:
Józef HANSEL

Risk assessment using the example of a container transshipment system

Key-words

Risk assessment, container terminal.

Summary

The paper represents a discussion about the risk assessment for a transshipment system in a reduced data condition. As a particular example, a transshipment system is presented. The article can be treated as first estimation. Future work and objectives are presented and considered in the concluding section of the paper.

