

ZASTOSOWANIE MODELI PROPORCJONALNYCH W ANALIZIE RYZYKA

Robert GUMIŃSKI, Stanisław RADKOWSKI

Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska
 ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, (022) 660 86 22, rgumin@simr.pw.edu.pl, ras@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy zaprezentowano zastosowanie proporcjonalnych modeli uszkodzeń w analizie niezawodności. We wprowadzeniu omówiono podstawy teoretyczne, a następnie przedstawiono przykład analizy niezawodności układu hydraulicznego z uwzględnieniem wpływu warunków pracy na niezawodność operatora. W końcowej części artykułu przedstawiono możliwość wykorzystania proporcjonalnych modeli uszkodzeń do estymacji wartości parametru skali na podstawie porównania rezultatów badań laboratoryjnych i danych eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: modele proporcjonalne, niezawodność, diagnostyka.

USING OF PROPORTIONAL HAZARDS MODELS IN RELIABILITY ANALYSIS**Summary**

In the paper is explained the use of Proportional Hazards models in reliability analysis. At the beginning is presented a theoretical consideration on some application aspects. Next is presented an example of operator failure impact on reliability of hydraulic system. At the end of the paper are discussed the possibility of using the Proportional Hazards Model in evaluation of the scale parameter value on the basic of the labor experiments results and exploitation data comparison.

Keywords: Proportional Hazard, reliability, diagnostics.

1. WSTĘP

Wzrost wymagań związanych ze zmniejszeniem zagrożeń środowiska i poprawą bezpieczeństwa skomplikowanych systemów technicznych spowodował, że zagadnienia oceny niepewności występującej w procesach projektowania i podejmowania decyzji odnośnie przyjęcia określonego rozwiązania technicznego, budzą coraz szersze zainteresowanie wśród inżynierów i projektantów. Coraz częściej zwraca się uwagę na potrzebę oceny niepewności, szczególnie w przypadkach projektowania złożonych systemów technicznych i antropotechnicznych, podejmowania problemów wymagających zastosowania nowych technologii, niekonwencjonalnych rozwiązań systemowych, nowych materiałów, czy oceny możliwości wystąpienia awarii, która może spowodować rozległe straty. Oznacza to konieczność zdefiniowania problemów związanych ze sterowaniem bezpieczeństwem i niezawodnością procesu produkcyjno-eksploatacyjnego, zgodnie z założeniem, że system jakości i zarządzania ryzykiem ma zapobiegać powstawaniu trudnych sytuacji. Zatem, już w momencie definiowania przedsięwzięcia, należy określić osoby i zakres ich odpowiedzialności za poszczególne działania w procesie użytkowania wytworu. Związana z tym jest konieczność prowadzenia okresowej oceny projektu w istotnych stadiach projektowania.

Przywołując w tym miejscu normę [12], należy zgodnie z jej zaleceniami w ocenie uwzględnić następujące kryteria:

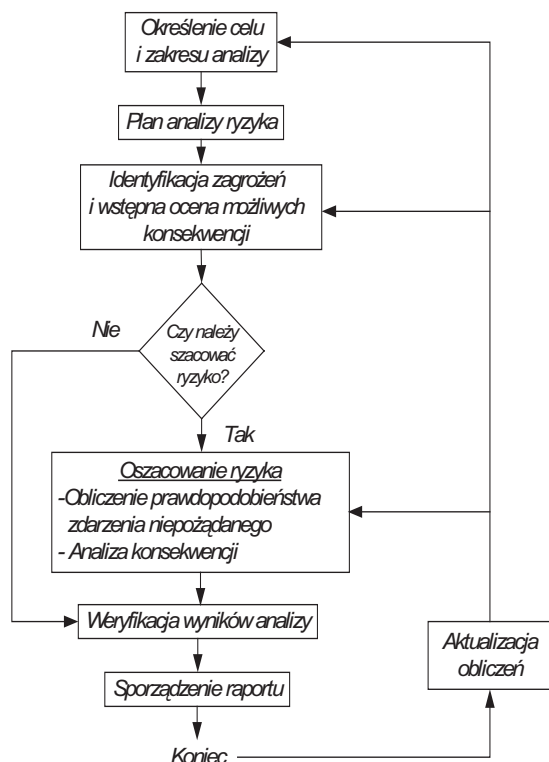
- konieczność zaspokojenia potrzeb odbiorcy, w tym bezpieczeństwo wytworu i kompatybilność ze środowiskiem;
- realizację przyjętych warunków technicznych i wymagań serwisu, w tym wymagań dotyczących niezawodności, naprawialności i obsługiwalności (np. dopuszczalne tolerancje i porównanie z możliwościami procesu wytwórczego oraz charakterystyki drobnych uszkodzeń);
- realizację wymagań związanych z wykonywaniem zadań funkcjonalnych procesu, obsługą i naprawą, w tym wymagań dotyczących bezpieczeństwa w systemie człowiek-technika-środowisko;
- identyfikację i nadzór parametrów procesu wpływających na jakość wytworów i utrzymywanie wymaganych tolerancji procesu (sam proces powinien być poddany analizie ryzyka).

Zgodnie z zaleceniami zawartymi w normach w toku postępowania podczas analizy ryzyka należy wyszczególnić następujące kroki:

- określenie zakresu analizy,
- identyfikację zagrożeń
- analizę zagrożeń,
- oszacowanie ryzyka.

Wynikający z zaleceń normy [13] algorytm analizy ryzyka przedstawiono na rysunku 1.

Uwzględniając przedstawione założenia w tym ujęciu szczególnie znaczenie ma fakt możliwości zmniejszenia niepewności oszacowania ryzyka, zarówno, jeśli idzie o dokładność prognozy czasu do awarii jak i prawdopodobnego scenariusza przebiegu procesu uszkodzania oraz sumarycznych kosztów usuwania skutków uszkodzeń.



Rys. 1. Zalecany przez normę algorytm analizy ryzyka PN-EN 1050

Celowym wydawałoby się uwzględnienie w analizie niezawodności dodatkowych czynników (zmiennych systemowych), co może doprowadzić do zmniejszenia niepewności oszacowania czasu do wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Narzędziem które może być wykorzystane do tego typu analizy są modele proporcjonalne.

2. MODELE PROPORCJONALNE

Zastosowanie modeli proporcjonalnych stwarza możliwość badania wpływu zmiennych systemowych (np. temperatury, ciśnienia, obciążenia, itp.) na niezawodność systemu.

Założenia modelu proporcjonalnego:

1. Stosunek intensywności uszkodzeń dla dwóch różnych wartości zmiennej systemowej nie zależy od czasu,
2. Intensywności uszkodzeń dla różnych wartości zmiennej systemowej są opisane tym samym rozkładem.

Na podstawie powyższych założeń możemy napisać:

$$\lambda(t, z, \beta) = \lambda_0(t) r(z, \beta) \quad (1)$$

gdzie:

t – czas

z – zmienna systemowa

β – nieznanymi parametry uwzględniający wpływ zmiennej systemowej

$\lambda_0(t)$ – intensywność uszkodzeń dla wartości zmiennej systemowej przyjętej jako poziom odniesienia

Przyjmując za modelem Coxa (1997):

$$r(z, \beta) = e^{z\beta} \quad (2)$$

otrzymujemy:

$$\lambda(t, z, \beta) = \lambda_0(t) e^{z\beta} \quad (3)$$

Model, który można zapisać za pomocą równania (1), nazywa się modelem proporcjonalnym, można go uogólnić na dowolną liczbę zmiennych systemowych:

$$\begin{aligned} \lambda(t, z_1, \dots, z_n, \beta_1, \dots, \beta_n) = \\ = \lambda_0(t) r(z_1, \dots, z_n, \beta_1, \dots, \beta_n) \end{aligned} \quad (4)$$

po podstawieniu modelu Coxa otrzymujemy:

$$\lambda(t, z_1, \dots, z_n, \beta_1, \dots, \beta_n) = \lambda_0(t) e^{z_1\beta_1 + \dots + z_n\beta_n} \quad (5)$$

Wykładnicza postać funkcji $r(z, \beta)$ gwarantuje, że funkcja intensywności przyjmuje wartości nieujemne bez względu na wartości współczynników.

W celu sprawdzenia czy rozpatrywany układ i zgromadzone dane o jego uszkodzeniach spełniają założenia modelu proporcjonalnego można przeanalizować stosunek intensywności uszkodzeń w funkcji czasu, jeżeli otrzymamy prostą równoległą do osi czasu to założenie jest spełnione (stosunek intensywności uszkodzeń dla dwóch różnych wartości zmiennej systemowej nie zależy od czasu).

Najczęściej wykorzystywanym rozkładem w analizie niezawodności jest rozkład wykładniczy dla którego intensywność uszkodzeń jest stała, zatem również stosunek intensywności dla dwóch grup danych o określonych uszkodzeniach będzie stały, co spełnia założenia modelu proporcjonalnego. Przyjmując założenie o rozkładzie wykładniczym wyklucza się możliwość uwzględnienia wpływu czasu. Z tego względu należy rozważyć możliwość użycia rozkładu Weibulla, zatem przeanalizujemy jakie warunki muszą spełniać parametry rozkładu żeby były spełnione założenia modelu proporcjonalnego. Intensywność uszkodzeń dla rozkładu Weibulla ma postać:

$$\lambda = \frac{\alpha}{\eta^\alpha} t^{\alpha-1} \quad (6)$$

natomiast stosunek intensywności:

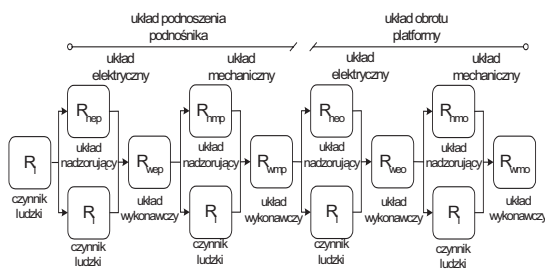
$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\frac{\alpha_1}{\eta_1^{\alpha_1}} t^{\alpha_1-1}}{\frac{\alpha_2}{\eta_2^{\alpha_2}} t^{\alpha_2-1}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \frac{\eta_2^{\alpha_2}}{\eta_1^{\alpha_1}} \cdot \frac{t^{\alpha_1-1}}{t^{\alpha_2-1}} \quad (7)$$

Z powyższej zależności wynika, że dla rozkładu Weibulla będą spełnione założenia modelu

proporcjonalnego tylko wtedy gdy współczynnik kształtu pozostanie stały dla obu grup danych. Wracając do rozkładu wykładniczego, który jest rozkładem Weibulla o współczynniku kształtu równym jeden, potwierdza się że rozkład wykładniczy spełnia założenia modeli proporcjonalnych

3. DOŚWIADCZENIE – WPŁYW WARUNKÓW PRACY OPERATORA NA NIEZAWODNOŚĆ UKŁADU HYDRAULICZNEGO

Analizie zostanie poddany układ hydrauliczny podnośnika przedstawiony w pracy [4] o strukturze niezawodnościowej przedstawionej na rysunku 2.



$R_i, R_{nep}, R_{wep} \dots$ – niezawodności poszczególnych elementów systemu
 $R_{system} = (R_{nep} + R_i - R_{nep}R_i)R_i R_{wep} (R_{nmp} + R_i - R_{nmp}R_i)R_{wmp} (R_{neo} + R_i - R_{neo}R_i)R_{weo} (R_{nmo} + R_i - R_{nmo}R_i)R_{wmo}$

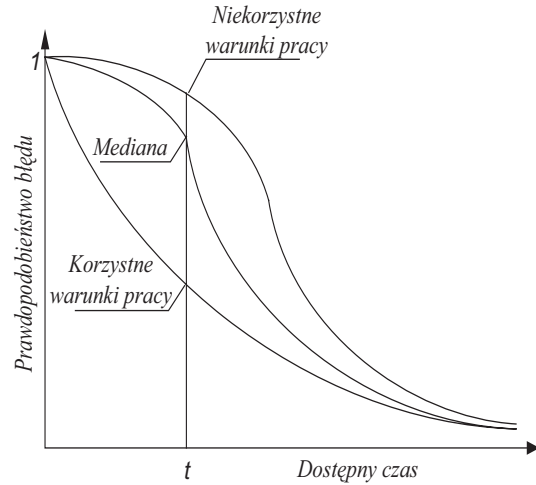
Rys. 2. Schemat struktury niezawodnościowej układu podnośnika [4]

Jak widać na schemacie blokowym w analizie uwzględniono również operatora jako potencjalne źródło błędów. Wykorzystując model diagnostyczny zastosowany w analizie niezawodności operatora przedstawiony na rysunku 3, obliczono parametry skali rozkładu Weibulla opisującego niezawodność operatora dla korzystnych i niekorzystnych warunków pracy. Rozpatrzono dwa warianty:

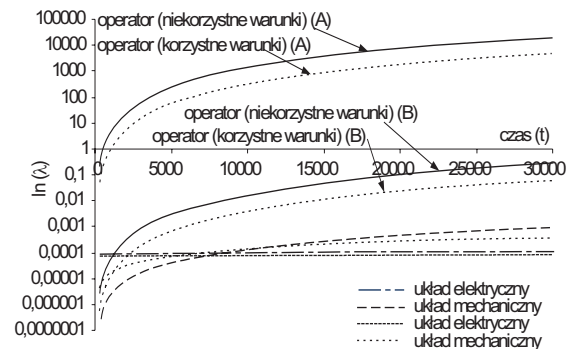
- A. operator jest elementem dominującym w układzie (intensywność błędów popełnianych przez operatora jest nieporównywalnie większa od intensywności uszkodzeń pozostałych elementów układu przedstawionego na rysunku 4)
- B. intensywność błędów popełnianych przez operatora jest porównywalna z intensywnością pozostałych elementów tego samego układu.

Następnie określono rozkłady opisujące występowanie uszkodzeń układu dla obu przypadków. Okazuje się, że dla danych z przykładu A rozkład prawdopodobieństwa niezawodności układu jest zgodny z rozkładem Weibulla dla obu grup danych (korzystne, niekorzystne warunki). Biorąc pod uwagę strukturę układu jest to wynik zaskakujący. Jednak można to wytłumaczyć uwzględniając, że intensywność błędów operatora jest tak duża, że funkcję struktury

układu można sprowadzić do niezawodności jednego elementu opisanej w tym przypadku rozkładem Weibulla. W siatce probabilistycznej rozkładu Weibulla (rysunek 5) linie trendu dla obu grup danych są równoległe więc współczynniki kształtu mają tę samą wartość (rysunek 6).

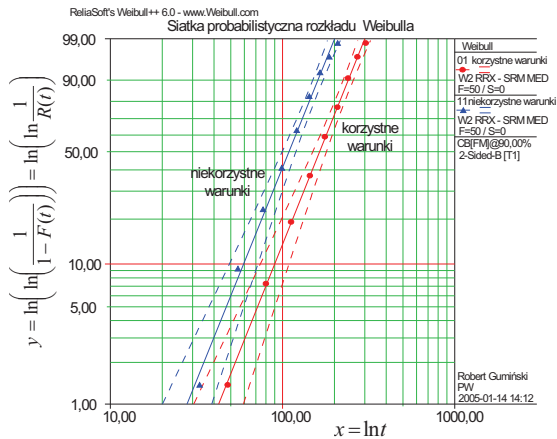


Rys. 3. Wpływ warunków zewnętrznych na prawdopodobieństwo popełnienia błęd

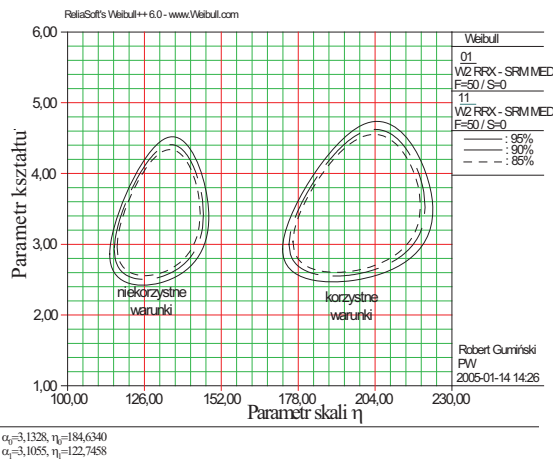


Rys. 4. Intensywności uszkodzeń poszczególnych elementów

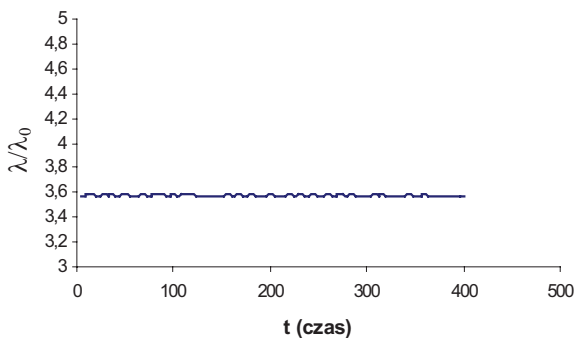
Na tej podstawie, korzystając z zależności (7) można powiedzieć, że przykład ten spełnia założenia modelu proporcjonalnego. Potwierdza to przebieg funkcji stosunku intensywności uszkodzeń w czasie (rysunek 7). Wynika stąd, że nawet przy bardzo rozbudowanym układzie, jeżeli intensywność uszkodzeń jednego elementu jest dominująca, funkcję struktury niezawodności całego układu sprowadzić można do rozkładu prawdopodobieństwa opisującego niezawodność tego elementu.



Rys. 5. Przedstawienie danych dla wariantu A w siatce probabilistycznej rozkładu Weibulla



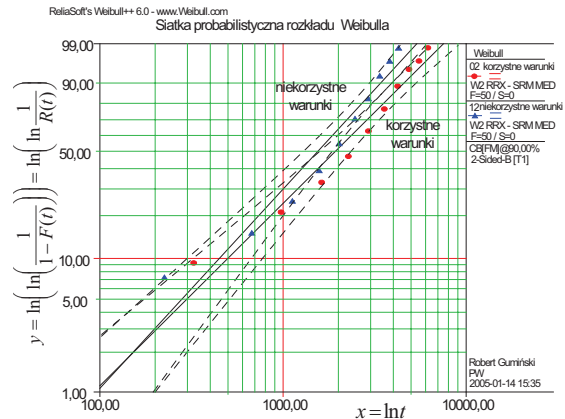
Rys. 6. Pola ufności parametrów rozkładu Weibulla dla wariantu A



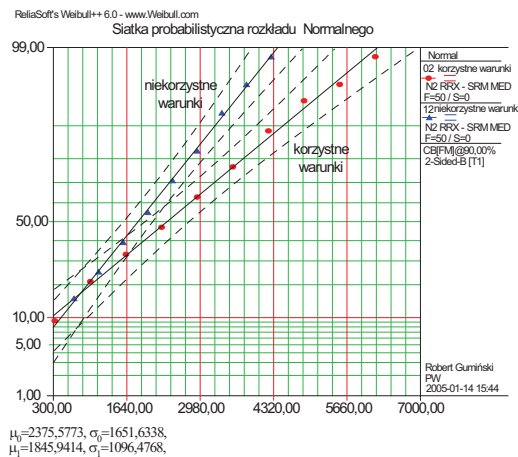
Rys. 7. Przebieg stosunku intensywności uszkodzeń w czasie dla wariantu A

W trakcie analizy przypadku B okazało się, że niezawodność układu nie może być opisana rozkładem Weibulla (rysunek 8). Można natomiast opisać ją rozkładem normalnym (rysunek 9). Otrzymana postać rozkładu prawdopodobieństwa można wyjaśnić na podstawie centralnego twierdzenia granicznego i twierdzenia Lapunowa, które wskazuje, że: ”jeśli na rozkład danej cechy

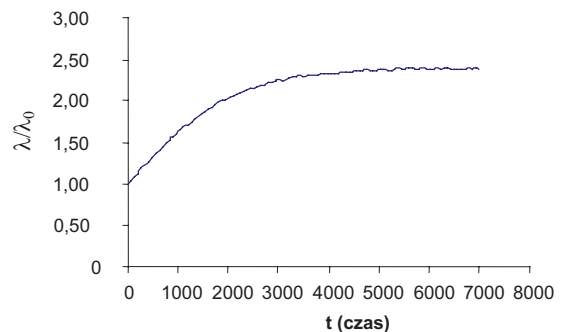
oddziałuje wiele czynników to może ona mieć rozkład normalny”. Równocześnie z analizy stosunku intensywności wynika, że jest on zmienny w czasie (rysunek 10), zatem nie jest spełnione założenie wymagane w przypadku modelu proporcjonalnego.



Rys. 8. Przedstawienie danych dla wariantu B w siatce probabilistycznej rozkładu Weibulla

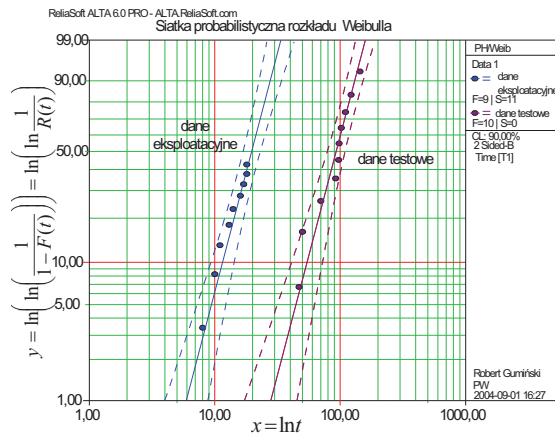


Rys. 9. Przedstawienie danych dla wariantu B w siatce probabilistycznej rozkładu normalnego

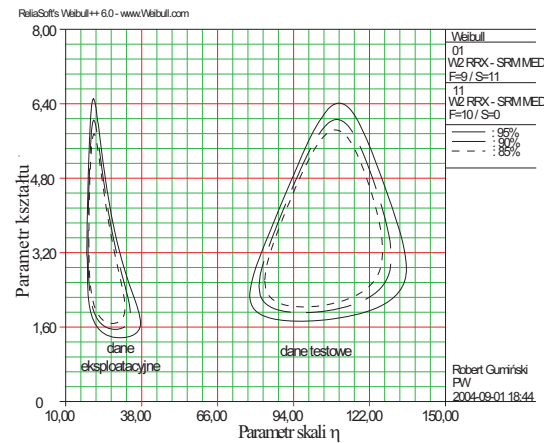


Rys. 10. Przebieg stosunku intensywności uszkodzeń dla wariantu B

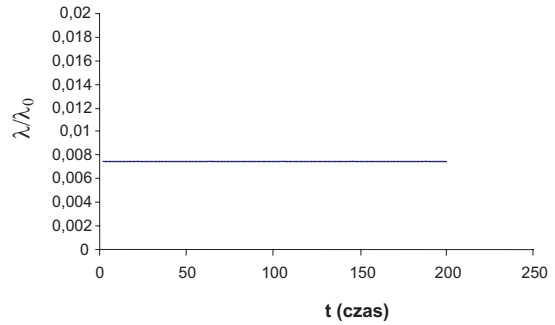
Na koniec zostanie przedstawiony przykład wykorzystania modeli proporcjonalnych do przeliczania danych laboratoryjnych na dane eksploatacyjne. Mamy dwie grupy danych jedna zgromadzona w trakcie prób laboratoryjnych druga podczas eksploatacji, zostały one przedstawione w siatce probabilistycznej rozkładu Weibulla (rysunek 11). Linie trendu dla obu grup danych są równoległe, więc współczynniki kształtu są takie same (rysunek 12), z tego wynika, że są spełnione założenia modelu proporcjonalnego, co potwierdza się po przeanalizowaniu stosunku intensywności uszkodzeń (rysunek 13).



Rys. 11. Porównanie rozkładu danych eksploatacyjnych i testowych za pomocą siatki probabilistycznej rozkładu Weibulla



Rys. 12. Ilustracja zakresu zmienności parametru kształtu i skali rozkładu Weibulla dla danych eksploatacyjnych i testowych



Rys. 13. Sprawdzenie warunku stosowalności modelu proporcjonalnego dla danych eksploatacyjnych i testowych

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono możliwość modelowania wpływu dodatkowych czynników na niezawodność obiektu za pomocą modeli proporcjonalnych. Taki sposób ujęcia zagadnienia niezawodności pozwala zmniejszyć niepewność odnośnie diagnozowania czasu do wystąpienia awarii, co jest jednym z podstawowych zadań diagnostyki technicznej. Sprawdzone również warunki stosowalności tych modeli i wskazano na ograniczenia, szczególnie konieczność zachowania niezmienności stosunku intensywności uszkodzeń od czasu oraz konieczność zachowania rozkładu dla różnych wartości zmiennej systemowej. Przedstawione przykłady zastosowań wskazują na możliwość badania wpływu zmiennych systemowych (np. temperatury, ciśnienia, obciążenia, itp.) na niezawodność systemu, oraz transformacji danych laboratoryjnych na dane eksploatacyjne. Została również ukazana możliwość uproszczenia struktury niezawodnościowej systemu gdy występuje jeden element o znacznie wyższej intensywności uszkodzeń niż pozostałe elementy. Również można zauważyć, że gdy element o największej uszkodzalności spełnia założenia modelu proporcjonalnego to i cały układ będzie spełniał te założenia.

LITERATURA

1. Chow G. C., Ekonometria, PWN. Warszawa 1985.
2. Cox D.R., Regression models and life tables, Journal of Royal Statistical Society, series B, Vol. 34 pp 187-220, 1997.
3. Cempel C., Natke H.G., Yao J.T.P., Symptom reliability and Hazard for systems condition monitoring, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, No 3, pp 495-509, 2000.

4. Gumiński R., Radkowski S., Sobczykiewicz W., *Zastosowanie proporcjonalnych modeli uszkodzeń w analizie niezawodności na przykładzie układu antropotechnicznego*, Problemy Maszyn Roboczych, Warszawa 2004.
5. Hosmer D. W., Lemeshow S., *Applied Logistic Regression*, John Wiley & Sons Nowy Jork 1989.
6. Hosmer D.W., Lemeshow S., *Applied survival analysis*, John Wiley & Sons, New York, USA 1998.
7. Radkowski S., *Logitowy model diagnostyczny*, XXIV Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyki Maszyn, Zeszyt 2, str. 41÷46, WTPS 1997.
8. Radkowski S., *Podstawy bezpiecznej techniki*, OWPW, Warszawa 2003.
9. Radkowski S., *Wykorzystanie sygnału drganiowego w ocenie ryzyka zmęczeniowego wyłamania zęba*, XXVII Zimowa Szkoła Niezawodności, Tom II ITEE, Radom 1999.
10. Radkowski S., *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*, ITEE, Radom 2002.
11. Theil H., *Zasady ekonometrii*, PWN Warszawa 1979
12. ISO 9004-3:2000 *Quality management systems - Guidelines for performance improvements. -for quality improvement.*
13. PN-EN 1050. *Zasady oceny ryzyka*, 1999.



Mgr inż. Robert GUMIŃSKI uczestnik studiów doktoranckich na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Zainteresowania naukowe – bezpieczeństwo systemów technicznych, ryzyko techniczne.



Prof. dr inż. Stanisław RADKOWSKI profesor Instytutu Podstaw Budowy Maszyn PW, kierownik zespołu Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka. Prezes Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną i analizą ryzyka technicznego.