

GRZEGORZ KACZOR\*

## NIEZAWODNOŚĆ WYBRANYCH PAR CIERNYCH PIERŚCIEŃ TŁOKOWY–TULEJA CYLINDROWA

### RELIABILITY OF CHOSEN FRICTION PAIRS OF PISTON RING–CYLINDER SLEEVE

#### Streszczenie

Problematyka niezawodności współczesnych obiektów technicznych nabiera szczególnego znaczenia ze względu na wzrost ich złożoności. Narzędziami zwiększającymi efektywność analiz niezawodności są aplikacje komputerowe umożliwiające m.in. prowadzenie symulacji czasu poprawnej pracy systemów, prognozowanie niezawodności oraz jej optymalizację. W niniejszym artykule zdecydowano się wykorzystać aplikację Weibull++ do modelowania niezawodności skojarzenia pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa na podstawie danych empirycznych przedstawionych w pracy [5].

*Słowa kluczowe: analiza niezawodności, pierścień tłokowy, tuleja cylindrowa, metoda największej wiarygodności*

#### Abstract

The problems of reliability of modern technical facilities is of particular importance due to the increase in their complexity. The tools that increase the efficiency of reliability analysis are computer applications, including simulation of reliability, prediction and optimization. In this paper, it was decided to use the Weibull++ application to associate reliability modeling piston ring – cylinder sleeve based on life data presented in.

*Keywords: reliability analysis, piston ring, cylinder sleeve, maximum likelihood method*

\* Mgr inż. Grzegorz Kaczor, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Problem niezawodności współpracy pierścieni tłokowych z tulejami cylindrów był w literaturze wielokrotnie omawiany [3, 5, 7]. Wspomniane rodzaje par ciernych są elementami wykonywanymi z zachowaniem szczególnej precyzji, od których wymaga się jednocześnie wysokich właściwości tribologicznych (ograniczenie strat energii związanych z tarcieniem) i wytrzymałościowych (wysoka granica plastyczności, udarność, wytrzymałość na ściskanie i zginanie).

Szczególne znaczenia przy prowadzeniu analiz niezawodności złożonych obiektów technicznych nabiera wykorzystanie metod symulacji komputerowych z użyciem specjalistycznego oprogramowania, które pozwala m.in. wyznaczyć podstawowe charakterystyki funkcyjne niezawodności oraz dokonać jej prognozy. Jest to istotne przede wszystkim ze względu na charakter zjawisk fizycznych oddziałujących na obiekty. Losowość towarzysząca ich pracy sprawia, że nie może ona być opisana w sposób deterministyczny i utrudnia proces wnioskowania. Ponadto, zbiór informacji o funkcjonowaniu tych obiektów w zmieniających się warunkach otoczenia może wykazywać znaczną obszerność, co dodatkowo zwiększa czasochłonność analizy i wprowadza znaczny stopień jej komplikacji. Warto również wziąć pod uwagę niepewność wyników badań poddanych analizie. Pojawiają się błędy pomiarowe, których wielkość można określić za pomocą przedziałów ufności. Powyższe problemy dotyczące budowy właściwego modelu są jednocześnie przeciwstawione wzrostem odpowiedzialności obiektu rzeczywistego za powierzone mu zadania i stawiane wymagania.

Celem niniejszego artykułu było zastosowanie nowoczesnych metod wspomaganie komputerowego do oceny niezawodności pary cierniej na przykładzie skojarzenia pierścieni tłokowy–tuleja. Dodatkowo, wyznaczono zbiór kryteriów podobieństwa mechanicznego, które posłużą do przeniesienia otrzymanych wyników na obiekt rzeczywisty.

## 2. Zakres analizy wyników badań

Do analizy niezawodności pary cierniej pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa z użyciem specjalistycznego oprogramowania komputerowego wykorzystano wyniki badań z etapu I pracy [5], która dotyczyła określenia wpływu procesu zacierania na niezawodność i trwałość pierścieni tłokowych. Powstanie pracy [5] było podyktowane zaistniałą sytuacją, której koniecznością stała się rezygnacja z kosztownego importu zagranicznych pierścieni tłokowych na rzecz uruchomienia produkcji krajowej.

W celu dokonania analizy przyjęto dwuparametryczny rozkład Weibulla, którego funkcja gęstości prawdopodobieństwa dana jest następującą zależnością [8]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

gdzie:

- $\beta$  – parametr kształtu,
- $\eta$  – parametr skali.

Do estymacji parametrów modelu matematycznego wykorzystano metodę największej wiarygodności, stosowaną powszechnie w statystyce ze względu na jej wszechstronność oraz wysoką dokładność. Funkcja maksymalnej wiarygodności dana jest następującą zależnością [8]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^R f(x_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (2)$$

gdzie:

- $x$  – zmienna losowa typu ciągłego,  
 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k]$  – zbiór poszukiwanych parametrów.

Poszukiwane wartości parametrów  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$  otrzymuje się poprzez maksymalizację wyrażenia (2).

Średnie wartości czasu poprawnej pracy pary oraz średnie wartości temperatur, przy których dochodziło do zatarcia pary pierścieni tłokowy – tuleja cylindrowa wyznaczono z zależności (3):

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (3)$$

gdzie:

- $f(t)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa.

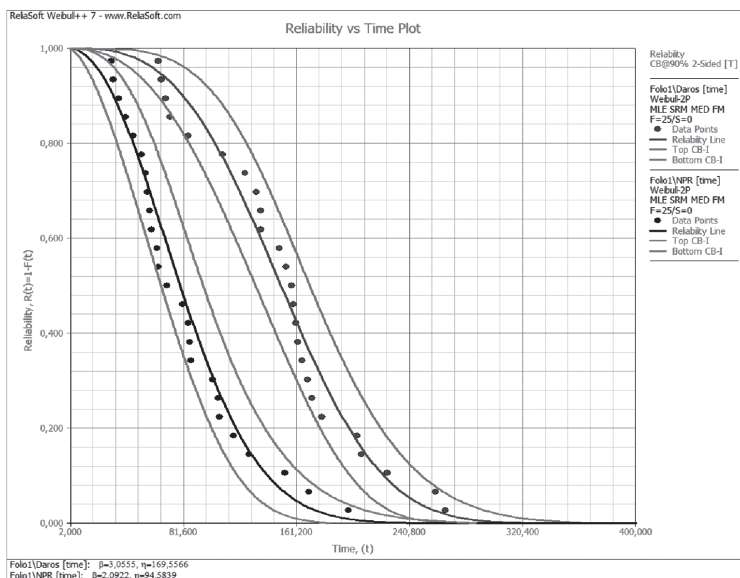
Dla badanych próbek firm „Daros” oraz „NPR” wyznaczono średnie wartości czasu oraz temperatury, przy których dochodziło do zatarcia. Przedstawiono również porównawcze charakterystyki funkcji niezawodności z obustronnymi przedziałami ufności na poziomie 0,9 oraz porównawcze charakterystyki funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla obu próbek w odniesieniu do czasu poprawnej pracy i temperatury zatarcia.

### 3. Analiza niezawodności pary ciernej

Dane do analizy zostały przedstawione w tabeli 1. Dotyczą one czasów poprawnej pracy badanych próbek, dla których przejście do stanu niezdatności odpowiadało chwili wystąpienia ich zatarciu. Zebrano również wartości temperatur zacierających się próbek.

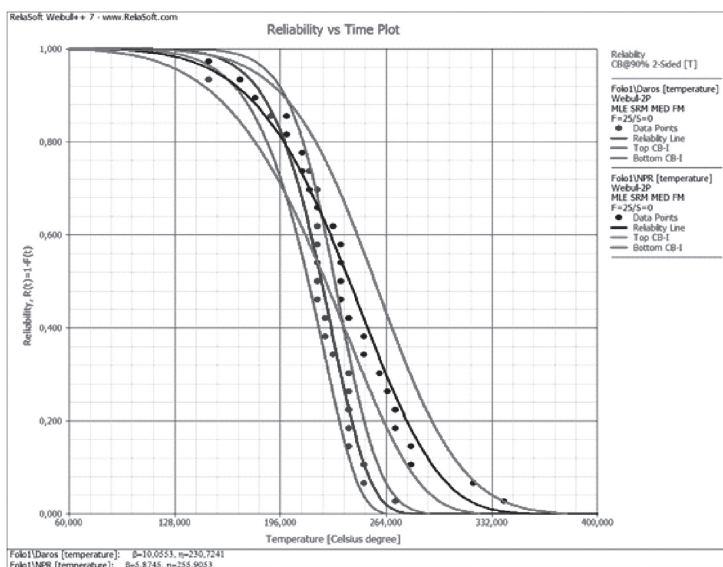
**Czas pracy i odpowiadająca mu temperatura zatarcia dla badanych próbek [5]**

Lp.	Daros		NPR	
	czas pracy [s]	temperatura [°C]	czas pracy [s]	temperatura [°C]
1	64	230	31	235
2	66	220	32	170
3	69	220	36	220
4	72	250	41	210
5	85	240	46	230
6	109	200	52	265
7	125	220	55	150
8	133	180	56	240
9	136	225	58	210
10	136	240	59	200
11	149	220	63	280
12	154	240	64	260
13	158	210	70	250
14	159	150	81	280
15	161	270	85	235
16	162	150	86	270
17	165	240	87	320
18	169	240	102	200
19	172	250	106	235
20	179	225	107	215
21	204	215	117	180
22	207	220	128	235
23	225	220	153	340
24	259	220	170	270
25	266	190	198	250



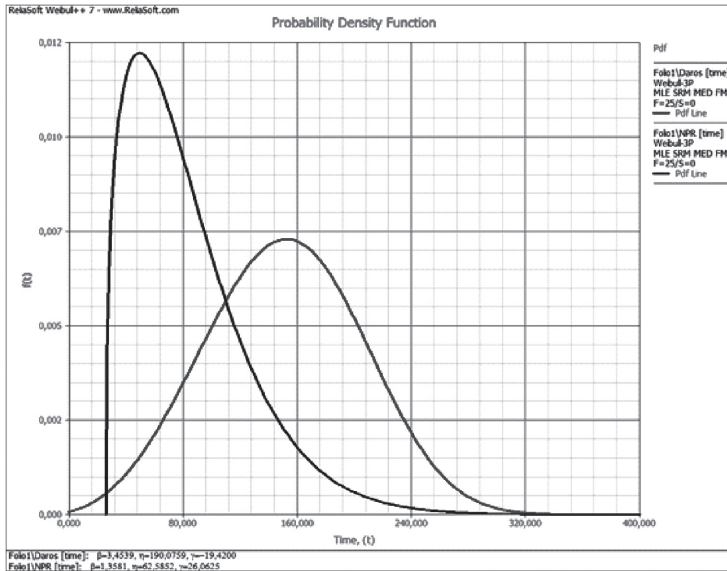
Rys. 1. Charakterystyki niezawodności pierścieni „Daros” oraz „NPR” w odniesieniu do czasu pracy z obustronnymi przedziałami ufności

Fig. 1. Reliability plots of piston rings “Daros” and “NPR” in relation to operating time with two sided confidence bounds



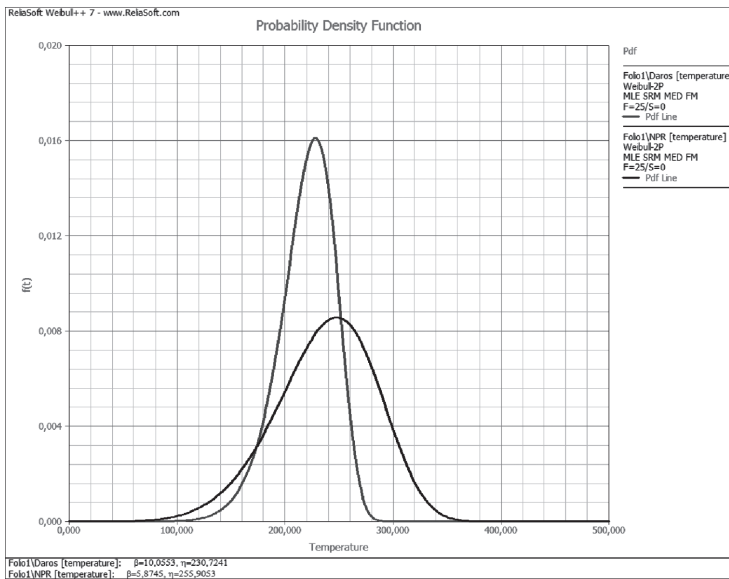
Rys. 2. Charakterystyki niezawodności pierścieni „Daros” oraz „NPR” w odniesieniu do temperatury zatarcia z obustronnymi przedziałami ufności

Fig. 2. Reliability plots of piston rings “Daros” and “NPR” in relation to seizing temperature with two sided confidence bounds



Rys. 3. Charakterystyki gęstości prawdopodobieństwa pierścieni „Daros” oraz „NPR” w odniesieniu do czasu pracy

Fig. 3. Probability density plots of piston rings “Daros” and “NPR” in relation to operating time



Rys. 4. Charakterystyki gęstości prawdopodobieństwa pierścieni firmy „Daros” oraz „NPR” w odniesieniu do temperatury zatarcia

Fig. 4. Probability density plots of piston rings “Daros” and “NPR” in relation to seizing temperature

Średnie wartości czasu poprawnej pracy oraz temperatur, przy których dochodziło do zatarcia badanych próbek, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

### Średnie wartości czasu poprawnej pracy i temperatur do zatarcia

Daros		NPR	
średni czas pracy do zatarcia [s]	średnia temperatura zatarcia [°C]	średni czas pracy do zatarcia [s]	średnia temperatura zatarcia [°C]
151,53	219,55	83,78	237,13

Dokonując porównania charakterystyk prawdopodobieństwa poprawnej pracy próbek obu typów oraz średnie wartości czasów i temperatur, przy których dochodziło do zatarcia, można stwierdzić, że znacznie większą niezawodnością wykazują się pierścienie firmy „Daros”. Można to zauważyć przede wszystkim w przypadku odniesienia do czasu pracy, gdzie próbki firmy „Daros” wykazują niemal dwukrotnie wyższą przewagę nad próbkami „NPR”. W przypadku analizy temperatury zatarcia różnica wartości obu próbek nie jest już tak wyraźnie zauważalna, ale w tym przypadku przemawia na korzyść próbek „NPR”.

W poddanym analizie skojarzeniu pierścieni tłokowy–tuleja cylindrowa wiodącym procesem zużycia prowadzącym do wystąpienia stanu niezdatności jest zużycie adhezyjne z głębokim wyrywaniem [5]. Ponadto do zatarcia dochodzi zawsze przy częściowym udziale zużycia cieplnego, spowodowanego zrywaniem mostków tarciovych i nadtopieniem cząstek współpracujących elementów. Istotnym czynnikiem w procesie kształtowania niezawodności omawianej pary kinematycznej jest również stereometria powierzchni trących elementów oraz jej zmiana w procesie eksploatacji technicznej.

#### 4. Analiza wymiarowa

Istotnym etapem analizy wyników badań eksperymentalnych na modelach jest wyznaczenie kryteriów podobieństwa mechanicznego, które pozwalają odnieść te wyniki do obiektów rzeczywistych. Pomocne w te kwestii jest zastosowanie analizy wymiarowej, będącej narzędziem matematycznym do wyznaczania bezwymiarowych parametrów modelowanego procesu tribologicznego [1, 6].

Przyjęto, że na zatarcie badanego skojarzenia mają wpływ następujące parametry:

- współczynnik długości nośnej profilu chropowatości  $tp$  [%],
- chropowatość powierzchni próbki wyrażona parametrem  $R_{a1}$  [ $\mu\text{m}$ ],
- chropowatość powierzchni przeciwpróbki wyrażona parametrem  $R_{a2}$  [ $\mu\text{m}$ ],
- obciążenie normalne styku  $Q$  [N],
- objętość próbki  $Vp$  [ $\text{m}^3$ ],
- częstotliwość zmian obciążenia  $n$  [Hz],
- zastępczy moduł sprężystości materiałów pary ciernej  $E$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ],
- prędkość względna poślizgu  $v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Zbiór parametrów determinujących niezawodność pary ciernej można zatem opisać za pomocą następującej funkcji:

$$\Omega = F(t_p, R_{a1}, R_{a2}, Q, V_p, n, E, v) \quad (4.1)$$

Wykorzystując uproszczoną formę przekształceń, przedstawioną w pracy Nowaka [6], otrzymano następującą macierz wymiarową:

Tabela 3

**Macierz wymiarowa przyjętych parametrów skojarzenia**

	$p_0$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$
	$t_p$	$R_{a1}$	$R_{a2}$	$V_p$	$E$	$Q$	$n$	$v$
<b>L</b>	0	0	0	3	1	1	0	1
<b>M</b>	0	-1	-1	0	-1	1	0	0
<b>T</b>	0	0	0	0	-2	-2	-1	-1

gdzie w przyjętym układzie SI:  $L$  [m] – długość,  $M$  [kg] – masa,  $T$  [s] – czas.

Analiza wymiarowa opiera się na wykorzystaniu wyznacznika macierzy trzech parametrów podstawowych, które są związane (oznaczone w tabeli pogrubioną ramką), tzn.  $D_0 \neq 0$ . Stosując twierdzenie Buckinghama [1], można przekształcić zapis 4.1. w postać bezwymiarowych liczb kryterialnych:

$$\pi_0 = F(\pi_1 \dots \pi_i) \quad (4.2)$$

Z powyższej macierzy otrzymuje się układ równań wymiarowych:

$$\begin{aligned} 3p_3 + p_4 + p_5 + p_7 &= 0 \\ -p_1 - p_2 - p_4 + p_5 &= 0 \\ -2p_4 - 2p_5 - p_6 - p_7 &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Układ ten został rozwiązany względem parametrów związanych, do których należą:  $p_5, p_6, p_7$ :

$$\begin{aligned} p_5 &= p_1 + p_2 + p_4 \\ p_6 &= -p_1 - p_2 + 3p_3 - 2p_4 \\ p_7 &= -p_1 - p_2 - 3p_3 - 2p_4 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Macierz rozwiązań została przedstawiona w tabeli 4.



Macierz rozwiązań wielkości fizycznych odwzorowanych w modelu

$\pi_i$	$p_0$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$
	$t_p$	$R_{a1}$	$R_{a2}$	$Q$	$V_p$	$n$	$E$	$v$
$\pi_0$	1	0	0	0	0	0	0	0
$\pi_1$	0	1	0	0	0	1	-1	-1
$\pi_2$	0	0	1	0	0	1	-1	-1
$\pi_3$	0	0	0	1	0	0	3	-3
$\pi_4$	0	0	0	0	1	1	-2	-2

Zestaw zgrupowanych parametrów, tzw. kompleksów będących wynikami analizy wymiarowej, jest następujący:

$$\pi_0 = t_p = \pi_1 = \frac{R_{a1} \cdot n}{E \cdot v}; \pi_2 = \frac{R_{a2} \cdot n}{E \cdot v}; \pi_3 = \frac{Q \cdot 3E}{v^{-3}}; \pi_4 = \frac{V_p \cdot n}{E^{-2} \cdot v^{-2}} \quad (4.5)$$

Wyrażenie 4.5. zgodnie z twierdzeniem Buckinghama sprowadza się do postaci bezwymiarowej:

$$t_p = f\left(\frac{R_{a1} \cdot n}{E \cdot v}; \frac{R_{a2} \cdot n}{E \cdot v}; \frac{Q \cdot 3E}{v^{-3}}; \frac{V_p \cdot n}{E^{-2} \cdot v^{-2}}\right) \quad (4.6)$$

Postać funkcji  $f$  można wyznaczyć wyłącznie na drodze doświadczalnej.

## 5. Wnioski

W niniejszym artykule dokonano analizy niezawodności skojarzenia pierścieni tłokowo-tuleja cylindrowa na podstawie wyników przeprowadzonych badań. Analiza wykazała znaczne rozbieżności między charakterystykami niezawodnościowymi pierścieni firm „Doros” i „NPR”. Różnice te są dowodem na szeroką skalę problemu optymalizacji niezawodności obiektów technicznych ze względu na ich prawdopodobieństwo poprawnej pracy, istotnego nie tylko dla ich producentów, ale również eksploatorów. Znaczenie wspomnianego wyżej problemu stało się podstawą do poszukiwania nowoczesnych rozwiązań w zakresie jego rozwiązywania. Jednymi z nich są kompleksowe i elastyczne aplikacje komputerowe pozwalające na rzetelną analizę niezawodności systemów, które stają się coraz bardziej złożone. Dodatkowe wykonanie analizy wymiarowej i wyznaczenie kryteriów podobieństwa, których zachowanie w stopniu wystarczającym spełnia wymagania kryteriów podobieństwa mechanicznego okazało się wygodną i przydatną metodą odnoszenia otrzymanych wyników do obiektów rzeczywistych.

## Literatura

- [1] Buckingham E., *On Physically Similar Systems*, Physical Reviews IV, IV 1914, 4.
- [2] Guzowski S., *Analiza zużycia frettingowego w połączeniach wciskowych na przykładzie osi zestawów kołowych pojazdów szynowych*, Monografia 284, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.
- [3] Kaczor G., *Analiza niezawodności układu wtryskowego typu Common Rail*, praca dyplomowa magisterska, Kraków 2011.
- [4] Manzini R., Regatierra A., Pham H., Ferrari E., *Maintenance for Industrial Systems*, Springer Series in Reliability Engineering, 2010.
- [5] Lisowski Z. i in., *Wpływ wybranych parametrów fizykalnych żeliwnych pierścieni tłokowych silników spalinowych dużej mocy na proces mikrozacierania. Etap I*, IPSz, Politechnika Krakowska, Kraków 1979.
- [6] Nowak Z., *Ogólna metoda wyznaczania zupełnego układu iloczynów bezwymiarowych*, Czasopismo Techniczne z. 6, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1969.
- [7] Wajand A., Wajand T., *Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993, 2005.
- [8] *Life Data Analysis Reference*, Weibull++ 7. Reliasoft Corporation, Tucson AZ USA 1999–2007.