

DIAGNOZOWANIE SPECJALNYCH ŁOŻYSK TOCZNYCH

Michał STYP-REKOWSKI

Wydział Mechaniczny, Zakład Obrabiarek i Robotów

Akademia Techniczno-Rolnicza, ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, E-mail: msr@atr.bydgoszcz.pl

Streszczenie

W artykule rozpatrzono możliwości wykorzystania oporów ruchu jako sygnału w diagnozowaniu łożysk tocznych. Przyjmując określoną wartość oporów jako wartość graniczną wyznaczano trwałość łożysk. Badania przeprowadzono na przykładzie skośnych łożysk kulkowych. Stwierdzono, że rozkład wyników eksperymentalnych badań trwałości łożysk określonej w powyższy sposób nie zawsze pokrywał się z typowym dla łożysk tocznych rozkładem Weibulla. Na podstawie przeprowadzonych testów zgodności λ Kołmogorowa z hipotetycznymi rozkładami: normalnym i beta stwierdzono, że w większości testowanych przypadków nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładów badanych populacji z rozkładami hipotetycznymi. Badania nie wykazały istnienia rozkładu uprzywilejowanego.

Słowa kluczowe: Łożyska toczne, trwałość, opory ruchu, sygnał diagnostyczny, rozkłady zmiennych

DIAGNOSE OF SPECIAL ROLLING BEARINGS

Michał STYP-REKOWSKI

Summary

In this paper there are discussed the possibilities of application of resistance to motion in diagnose of rolling bearings. Durability of the bearings is assigned as a boundary value assuming determined value of resistance to motion. The experiments were worked out on the angular ball bearings as the objects of investigations. It seems that experiment's results distribution of durability determined on such the way not always was the same like for typical rolling bearings, i.e. Weibull distribution. On the base of the λ Kolmogorov test of goodness of fit with hypothetical distributions: Gaussian, beta and Weibull one discover that in major part of tested events there are not the reason for turning down the hypothesis of goodness of fit of tested population with hypothetical distributions. The tests did not indicate preferential distributions.

1. WPROWADZENIE

Łożyska toczne to typowe elementy powszechnie stosowane we wszelkiego rodzaju maszynach. Mają one zwykle niewielki udział w całości kosztów i masie maszyn lub urządzeń, duży natomiast jest ich wpływ na jakość. Z danych literaturowych wynika, że uszkodzenia węzłów kinematycznych, wśród nich węzłów łożyskowych, nawet w 90% przypadków stanowią przyczynę utraty zdolności całych maszyn [5].

Uwzględniając wymagania konstrukcyjne oraz oczekiwania użytkowników maszyn, jako wielkości kryterialne jakości łożysk tocznych przyjmuje się następujące cechy:

- zużycie:
 - zmęczeniuowe,
 - cierne,
- poziom drgań,
- opory ruchu.

Każda z powyższych cech ma swoją miarę (jedna lub więcej), która może być wykorzystywana

jako sygnał diagnostyczny. Wymienione kryteria można stosować oddzielnie bądź łącznie w różnych konfiguracjach.

W zależności od przeznaczenia łożysk znaczenie powyższych kryteriów będzie różne, np. łożyska stosowane w pojazdach samochodowych powinny charakteryzować się przede wszystkim dużą odpornością na zużycie, a w rowerach – małymi oporami ruchu. Tak więc, określane przez producentów wartości graniczne wielkości będących pochodnymi powyższych cech użytkowych mogą być różne w zależności od przeznaczenia łożysk.

Od przyjętego kryterium może również zależeć trwałość łożysk przyjmowana jako zdolność zachowania zdolności do realizowania założonych zadań. W takim ujęciu trwałości niektóre łożyska toczne już w chwili ich wytworzenia nie nadają się do konkretnych zastosowań, czyli dla pewnej grupy zastosowań ich trwałość może być równa zero [9].

2. ZAKRES PROPONOWANYCH BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH SPECJALNYCH ŁOŻYSK TOCZNYCH

W tworzeniu wszelkich procedur diagnostycznych podstawowymi zagadnieniami są [3, 10]:

- wnioskowanie diagnostyczne oparte na modelach matematycznych,
- wyznaczanie granicznych wartości wielkości przyjętych jako sygnały diagnostyczne.

Z powyższego stwierdzenia wynikają dwa zadania badawcze. Pierwsze z nich to wyznaczenie symptomów zmieniających się wraz ze zmianą stanu technicznego badanego obiektu a następnie opracowanie modeli, które stanowić powinny uogólniony opis wyników badań i zaobserwowanych relacji między wielkościami: umożliwiającymi opisanie stanu obiektu a przyjętymi jako sygnał diagnostyczny. Dla pełniejszej możliwości wykorzystania rezultatów badań należy także zidentyfikować rozkład wyników eksperymentu. W realizacji tego zadania można korzystać z ciągle rozszerzającego się zbioru modeli, np.: probabilistycznych, deterministycznych, neuronowych i innych.

Drugim zadaniem wynikającym z przyjętego na wstępie stwierdzenia jest ustalenie, w oparciu o racjonalne kryteria, wartości symptomu stanowiącej granicę między stanami: zdatnym i niezdatnym badanego obiektu. Przyjęcie takiej koncepcji prowadzi do dwuwartościowego wnioskowania diagnostycznego polegającego na porównaniu bieżącej wartości z wartością graniczną symptomu. Dla jednego symptomu stanu istnieć będą dwie alternatywne możliwości:

$$S < S_{gr} \quad \text{lub} \quad S \geq S_{gr} \quad (1)$$

Pierwszy przypadek to stan zdatności. Przekroczenie granicznej wartości wielkości przyjmowanej jako miara danej cechy oznacza utratę zdatności badanego obiektu czyli przejście ze stanu zdatności w stan niezdatności (chwilowej lub trwałej) – przypadek drugi.

Z przeprowadzonych powyżej rozważań wynika istotne znaczenie wyznaczenia granicznych wartości sygnałów diagnostycznych, których miarę w określonych warunkach przyjmuje się jako symptom stanu badanego obiektu.

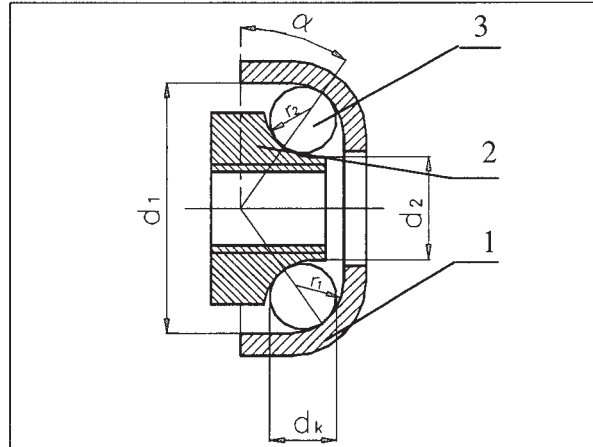
Powyższe zadania zostaną zrealizowane w celu umożliwienia diagnozowania łożysk specjalnych wykorzystując w tym celu monitorowanie oporów ruchu

3. DIAGNOZOWANY OBIEKT

W badaniach trwałości jako obiekt badań przyjęto specjalne łożyska toczne. Postać konstrukcyjna takiego łożyska przedstawiono na rys. 1. Jest to skośna odmiana łożyska kulkowego. Na podstawie analizy cech konstrukcyjnych badanych łożysk i porównania ich z cechami łożysk typowych zaliczono je do grupy łożysk specjalnych.

Łożyska kulkowe skośne z racji swoich geometrycznych cech konstrukcyjnych charakteryzują

się większym udziałem poślizgów w procesie zużycia niż ma to miejsce w łożyskach poprzecznych. Badania [6] wykazały, że ponad 50% łożysk eksploatowanych w pojazdach samochodowych, traci możliwość realizacji nałożonych zadań, w rezultacie zużycia ciernego. Ponieważ duża część łożysk tocznych w samochodach to różne odmiany łożysk skośnych, wyraźnie widać duże znaczenie zagadnienia oporów ruchu w diagnozowaniu tej odmiany łożysk.



Rys. 1. Uproszczona postać konstrukcyjna rowerowego łożyska tocznego wraz z charakterystycznymi wymiarami: 1-pierścień zewnętrzny, 2-pierścień wewnętrzny, 3-elementy toczne

Istotność rozważanego zjawiska spowodowała, że miara oporów ruchu – moment przeciwdziałający ruchowi – została przyjęta jako symptom stanu w proponowanej metodzie diagnozowania specjalnych skośnych łożysk kulkowych.

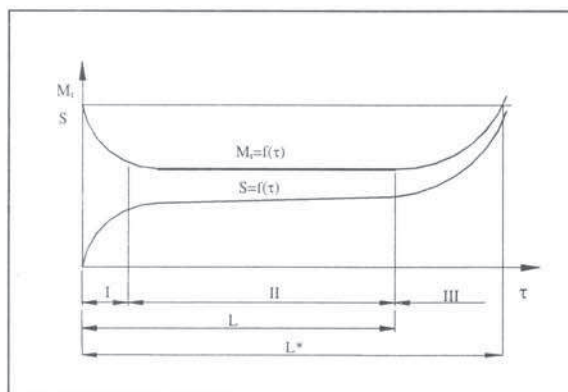
4. GRANICZNA WARTOŚĆ SYGNAŁU DIAGNOSTYCZNEGO

Trwałość, zarówno złożonego obiektu technicznego jak i jego części składowych to czas w jakim poprawnie wypełniają one nałożone zadania.

Typowy proces zużycia może być zobrazowany, np. krzywą „życia” obiektu technicznego. Najbardziej ogólna postać tej krzywej, przedstawiona na rys. 2, charakteryzuje się trzema stadiami zmian intensywności symptomu (S):

- I - degresywnego wzrostu,
- II - ustalonego poziomu lub niewielkich zmian,
- III - progresywnego wzrostu.

W dalszych rozważaniach wykorzystano wyniki eksperymentalnych badań specjalnych skośnych łożysk kulkowych [7]. W badaniach tych jedną z wielkości wyjściowych były właśnie opory ruchu (M). Krzywa „życia” dla tego symptomu ma postać tzw. krzywej wannowej i może być opisana, np. funkcją $M_i = f(\tau)$. Zmiana wartości oporów ruchu w funkcji czasu (τ) przebiega także w trzech stadiach, z których jedynie pierwszy ma odmienny charakter od omawianej wcześniej krzywej $S = f(\tau)$ - rys. 2.



Rys. 2. Krzywe „życia” obiektu technicznego jako funkcje czasu: 1 – intensywności symptomu zużycia, $S = f(\tau)$, 2 – poziomu oporów ruchu w łożysku, $M_t = f(\tau)$

W pierwszym z nich – nazywanym okresem docierania - obserwuje się obniżanie poziomu oporów ruchu głównie w wyniku zmian struktury geometrycznej powierzchni towarzyszących transformacji technologicznej warstwy wierzchniej w warstwę eksploatacyjną [1]. W drugiej połowie XX wieku w przemyśle, np. samochodowym, pojawiła się tendencja do minimalizacji tego okresu, tzn. jego skracania i zmniejszania obserwowanych w nim zmian intensywności symptomu lub samego symptomu stanu. Tendencja trwa do chwili obecnej i doprowadziła do tego, że okres docierania jest szczątkowy a w niektórych przypadkach można uznać, że w ogóle nie występuje.

Pozostałe dwa okresy różnią się intensywnością zmian lub czasem ich trwania albo obydwoma cechami łącznie. Te różnice, a przede wszystkim trudności w jednoznacznym zidentyfikowaniu momentu zakończenia okresu II i początku III były przyczyną zaproponowania innego sposobu określania trwałości łożysk. Jako trwałość w prezentowanych badaniach przyjmowano czas od początku pracy do momentu gdy wartość oporów ruchu w łożysku osiągała wartość równą początkowej. Graficzną interpretację tak ujętej trwałości, oznaczonej L^* , przedstawiono na rys. 2.

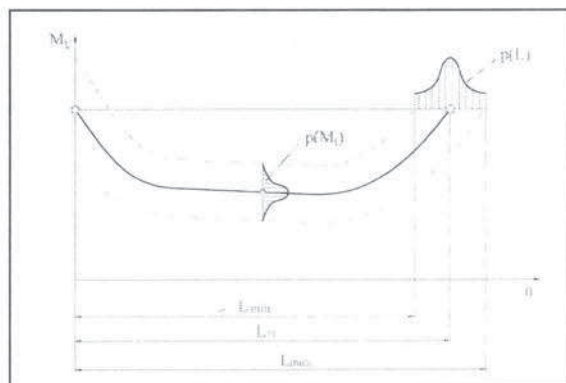
Przyjęta trwałość jest sumą okresów I i II oraz części okresu III. W tym ostatnim, badane łożyska wykazywały już niekiedy objawy zużycia w postaci drobnych wykruszeń zmęczeniowych, powodujących, między innymi zwiększoną emisję akustyczną. W dalszym ciągu w zadowalający sposób spełniały one swoje zasadnicze cele.

Wyznaczanie trwałości skośnych łożysk kulkowych na podstawie obserwacji oporów ruchu stanowi istotne novum w stosunku do metod tradycyjnych, np. wibroakustycznych, w których jako symptom przyjmuje się stan powierzchni roboczych.

5. ROZKŁAD WARTOŚCI BADANYCH WIELKOŚCI

Na etapie wnioskowania diagnostycznego istotnym zagadnieniem jest zidentyfikowanie rozkładu zmiennych wartości wielkości przyjętych jako symptom diagnostyczny. Umożliwia to właściwe opracowanie modelu matematycznego pozwalającego między innymi na szersze wykorzystanie wyników badań – nie tylko do celów diagnostycznych, lecz także, np. do prognozowania stanu technicznego badanych obiektów.

Zarejestrowane wyniki badań oporów ruchu charakteryzują się pewnym rozrzutem. Istnieje więc prawdopodobieństwo $p(M_t)$, z jakim można oczekiwać wartości M_t z zadanego przedziału. Ponieważ wartość oporów ruchu, równą tej na początku badań, przyjęto jako wartość graniczną przy wyznaczaniu trwałości łożysk, istnieje prawdopodobieństwo $p(L)$ o pewnym rozkładzie, uzyskania oczekiwanych trwałości z zadanego przedziału – rys. 3.



Rys. 3. Wartość oporów ruchu M_t jako funkcja ilości wykonanych obrotów n z hipotetycznymi rozkładami prawdopodobieństwa oporów ruchu $p(M_t)$ i trwałości $p(L_{n(10)})$

W przypadku łożysk, w których trwałość zdeterminowana jest przebiegiem zjawisk zmęczeniowych, z dużą dokładnością przyjmuje się, że wyniki badań trwałościowych można opisać rozkładem Weibulla – najczęściej trójparametrowym. Badania [7] wykazały, że w odniesieniu do specjalnych skośnych łożysk kulkowych nie zawsze jest to właściwe. Przeprowadzone badania statystyczne miały umożliwić zidentyfikowanie rzeczywistych rozkładów wyników badań doświadczalnych i porównanie ich z rozkładem typowym (Weibulla).

5.1. Wybór hipotetycznych rozkładów wyników badań empirycznych

Programy STATGRAPHICS i STATISTICA wykorzystywane do opracowania i prezentacji wyników badań, zarówno analitycznych jak również empirycznych, zawierają obszerne zbiory

rozkładów. W rezultacie ich przeglądu i analizy do dalszych rozważań przyjęto poniższe zbiory:

- normalny, o funkcji gęstości zmiennej x w postaci:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2s^2}} \quad (2)$$

przy czym x jest zmienną w przedziale: $(-\infty, +\infty)$,

- beta, dla którego funkcja gęstości zmiennej x należącej do przedziału $x \in (0,1)$ wyrażona jest zależnością:

$$f(x) = \frac{x^{a-1}(1-x)^{b-1}}{B(a,b)} \quad (3)$$

- Weibulla z funkcją gęstości zmiennej $x \in (0, +\infty)$ wyrażoną równaniem:

$$f(x) = a \cdot b^{-a} \cdot x^{a-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^a} \quad (4)$$

Symbole użyte w powyższych wzorach są zgodne z oznaczeniami powszechnie stosowanymi w statystyce.

Dwa pierwsze z nich wykazywały zgodność z wynikami empirycznymi podczas wstępnej, szacunkowej oceny przydatności poszczególnych rozkładów, natomiast rozkład Weibulla przyjęto jako typowy dla łożysk tocznych.

5.2. Wybór metody testowania

Do sprawdzania hipotezy, że badana populacja ma określony typ rozkładu służą testy zgodności. W praktyce najczęściej wykorzystywane są dwa z nich [4]:

- chi-kwadrat (χ^2),
- λ Kołmogorowa.

W praktyce badawczej używa się także testu wzajemnej zgodności rozkładów empirycznych, czyli testu Kołmogorowa-Smirnowa.

Test zgodności chi-kwadrat (χ^2)

Jest to jeden z najbardziej rozpowszechnionych testów zgodności. Stosuje się go zarówno do rozkładów ciągłych jak i skokowych. Populacje dzielone są na klasy wartości i dla każdej klasy z założonego rozkładu hipotetycznego oblicza się liczebności teoretyczne, które porównuje się z empirycznymi za pomocą odpowiedniej statystyki (χ^2). Gdy statystyka χ^2 obliczona na podstawie różnic między liczebnościami empirycznymi a teoretycznymi jest większa od wartości krytycznej χ^2_α wyznaczonej dla założonego poziomu istotności α , hipotezę, że badana populacja ma testowany rozkład teoretyczny odrzuca się.

Ograniczeniem stosowania tego testu jest liczność populacji. Musi być ona duża gdyż jej elementy dzielimy na klasy wartości, które powinny być dostatecznie liczne. Przyjmuje się, że każda klasa wartości powinna zawierać przynajmniej 8 wyników próby.

Test zgodności λ Kołmogorowa

W teście tym porównuje się dystrybuantę empiryczną z hipotetyczną. Jeśli populacja generalna ma rozkład zgodny z hipotezą to wartości dystrybuanty empirycznej i hipotetycznej powinny być we wszystkich badanych punktach zbliżone. Na wejściu do testu λ Kołmogorowa jest analiza bezwzględnych wartości różnic między tymi dwiema dystrybuantami. Największa różnica służy do budowy statystyki λ . Jej rozkład wykorzystuje się z kolei do wyznaczania obszaru krytycznego, przy czym jeżeli maksymalna różnica w pewnym punkcie obszaru zmienności badanej wielkości jest większa od wartości krytycznej λ_α to hipotezę, że rozkład populacji ma założoną dystrybuantę należy odrzucić.

Istotnym założeniem ograniczającym stosowanie tego testu jest warunek aby przyjęta w badaniach dystrybuanta hipotetyczna była ciągła.

Test zgodności Kołmogorowa-Smirnowa

Wykorzystywany jest on do weryfikowania hipotezy, że dwie populacje mają ten sam rozkład. Rozpatruje się w nim różnice między obydwiema dystrybuantami empirycznymi. Przy wyznaczaniu obszaru krytycznego dla tego testu korzysta się z granicznego rozkładu statystyki λ Kołmogorowa. Warunkiem przyjęcia lub odrzucenia hipotezy, że obie próby pochodzą z tej samej populacji są takie same jak w teście λ Kołmogorowa, tzn. gdy obliczona wartość statystyki λ jest większa od wartości krytycznej λ_α – hipotezę odrzucamy; w przeciwnym przypadku – nie ma podstaw do tego.

Test Kołmogorowa-Smirnowa ma ograniczone zastosowanie gdyż stosuje się go jedynie dla ciągłych rozkładów testowanej wielkości.

W wyniku wstępnej analizy uzyskanych wyników badań empirycznych, niezbędnej dla wyboru jednego z powyższych testów w trwałościowych badaniach analitycznych zdecydowano się zastosować test λ Kołmogorowa w wersji dla małej liczności próby [2]. O tym wyborze zdecydowały przede wszystkim dwa argumenty formalne:

- liczność populacji wynosiła 30 prób (przy zarejestrowanym rozrzucie była więc zbyt mała aby zastosować test chi-kwadrat),
- dystrybuanty przyjętych rozkładów hipotetycznych (normalnego, beta i Weibulla) są ciągłe.

6. WYNIKI BADAŃ

6.1. Badania eksperymentalne

Dla realizacji pierwszego z przyjętych w rozdziale 2 zadań badawczych wykorzystano badania eksperymentalne, w rezultacie których opracowano model matematyczny pozwalający określić poziom oporów ruchu w badanych łożyskach w funkcji ich cech konstrukcyjnych [7].

Jako zmienne niezależne w tych badaniach przyjęto:

- geometryczny współczynnik dopasowania kulki i profilu bieżni na pierścieniu wewnętrznym $\delta_2=2r_2/d_k$ – rys. 1 (trwałość tego elementu determinuje trwałość całego łożyska), przyjęty w przedziale $\langle 1,01; 1,09 \rangle$,
- napięcie wstępne P_x łożysk w węzle łożyskowym, w przedziale $\langle 10; 100 \rangle$ N,
- twardość bieżni H_2 na pierścieniu wewnętrznym: $H_2 = 150; 300, 450$ HV.

Czynnikami stałymi w badaniach były: obciążenie zewnętrzne, ($P_y = 250$ N) prędkość obrotowa ($n = 24$ s⁻¹), sposób smarowania, rodzaj i ilość smaru (na początku badań przestrzeń pomiędzy kulkami i bieżniami wypełniano smarem ŁT43), pozostałe geometryczne cechy konstrukcyjne łożyska.

Opracowany w rezultacie powyższych badań model matematyczny, ujmujący zależność oporów ruchu od wybranych cech konstrukcyjnych ma formę równania regresji drugiego stopnia [8]:

$$M_l = (-383,60 \delta_2 + 169,56 \delta_2^2 + 0,107P_x - 0,00018P_x^2 - 0,09193H_2 + 0,000117H_2^2 + 256,431)10^{-4}, \text{ Nm} \quad (5)$$

Moment oporu, który można obliczyć z powyższego równania jest przyjętym symptomem diagnostycznym a jego wartość stanowi wartość graniczną w przyjętej metodzie wyznaczania trwałości specjalnych łożysk tocznych. Wartość ta jest także równa oporom ruchu jakimi charakteryzują się nowe łożyska o określonych cechach konstrukcyjnych.

W tych samych badaniach wyznaczono równanie regresji w postaci:

$$L_{n(10)} = (25,48 \delta_2 - 14,06 \delta_2^2 + 0,07P_x + 0,02H_2 - 9,47)10^6, \text{ obr.} \quad (6)$$

umożliwiające określanie trwałości łożysk o takich samych jak wyżej cechach konstrukcyjnych.

Na podstawie wyżej przedstawionych rezultatów badań można więc stwierdzić, że zrealizowane zostało pierwsze zadanie badawcze sformułowane w rozdziale 2.

6.2. Badania analityczne

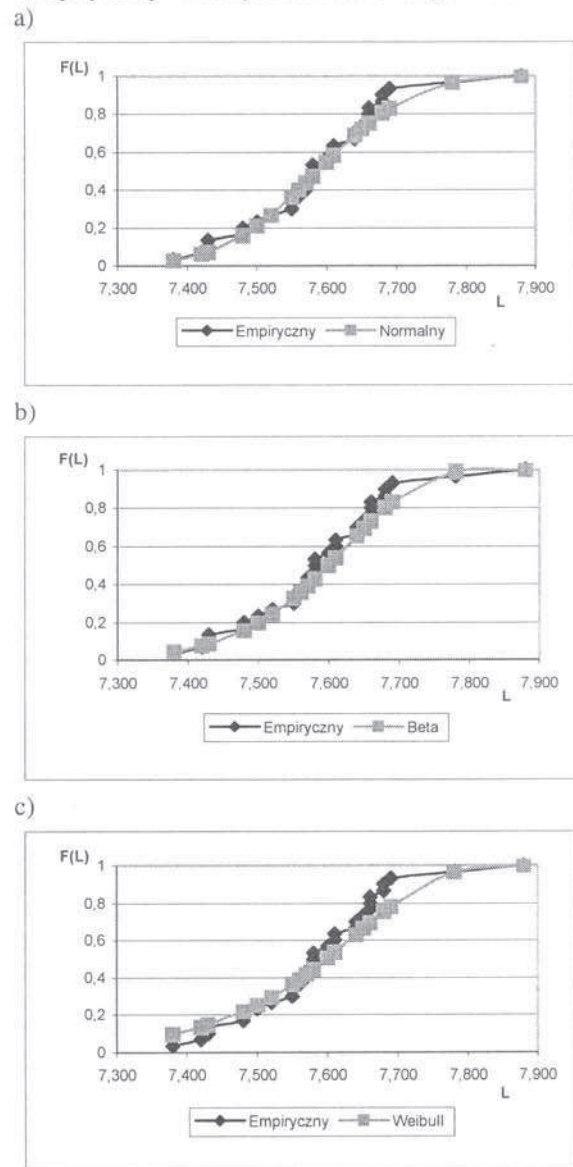
Testowi zgodności z wybranymi rozkładami poddano sześć 30 elementowych zbiorów wyników badań doświadczalnych oznaczonych od T1 do T6, przy czym poszczególne zbiory zawierały rezultaty badań łożysk, których pierścień wewnętrzny (przyjęte w badaniach jako próbki) wykonano z następujących materiałów:

- T1 i T2 – stal A11 poddana węgloazotowaniu,
- T3 i T4 – stal 45 ulepszone cieplnie do 30±2 HRC,
- T5 i T6 – stal 45 w stanie normalizowanym.

Nieparzyste zbiory (T1, T3, T5) utworzono z wyników badań próbek mających promień profilu bieżni wewnętrznej $r_2=2,50$ mm a parzyste (T2, T4, T6) z badań próbek o promieniu $r_2=2,55$ mm.

Ponieważ w teście λ Kołmogorowa dla zweryfikowania hipotezy o zgodności rozkładów

porównuje się dystrybuanty: hipotetyczną i empiryczną więc wyznaczono je dla wszystkich badanych rozkładów. Przykładowe wyniki obliczeń (dla zbioru T3) przedstawiono na rys. 4. Widoczna jest na nim duża zgodność dystrybuant we wszystkich porównywanych zestawach. Wyniki obliczonych statystyk potwierdzają te obserwacje gdyż stwierdzono, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności dystrybuant: hipotetycznej i empirycznej w żadnym z 18 testowanych zbiorów.

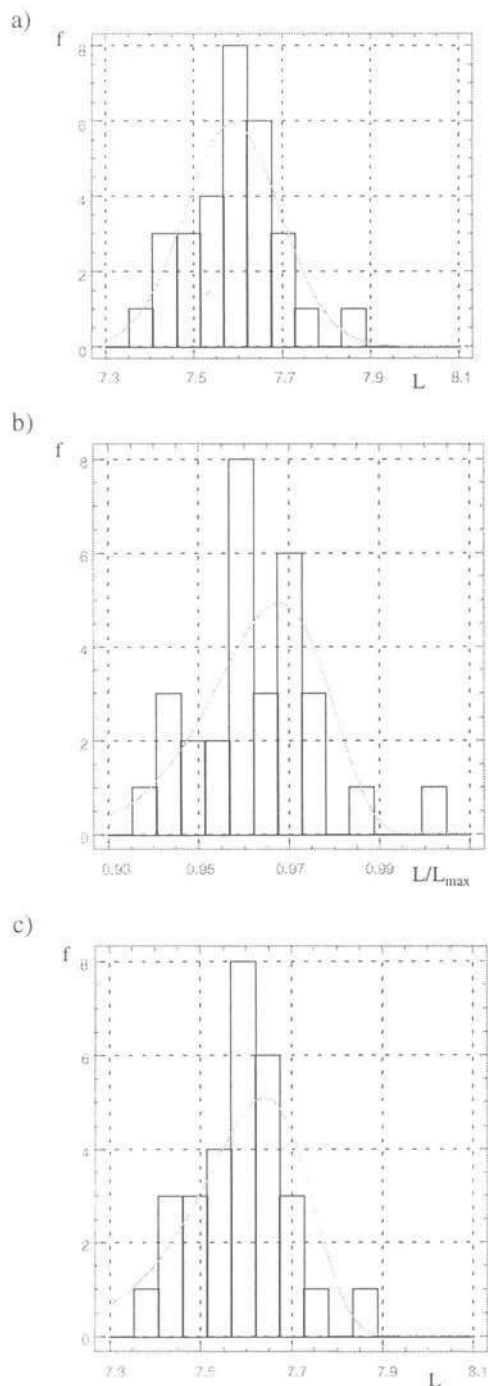


Rys. 4. Dystrybuanty empiryczne i hipotetyczne dla badanych rozkładów: a) normalnego, b) beta, c) Weibulla

Zgodność rozkładów wyników badań empirycznych z testowanymi rozkładami hipotetycznymi potwierdzają wykresy przedstawione na rys. 5 (wykonane także dla zbioru T3). Teoretyczne rozkłady gęstości wpisują się dobrze w histogramy przedstawiające rzeczywiste wyniki eksperymentu.

Na podstawie obliczonych wartości statystyk stwierdzono, że największy stopień zgodności z rozkładami empirycznymi ma rozkład normalny.

Badania analityczne dotyczące identyfikowania rozkładów wyników badań empirycznych można uznać za realizację drugiego zadania badawczego sformułowanego w początkowej części niniejszej pracy. W ten sposób zostały opracowane dane wejściowe umożliwiające diagnozowanie specjalnych łożysk tocznych na podstawie oporów ruchu w takiej odmianie łożysk tocznych.



Rys. 5. Histogramy empiryczne i wy-wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla rozkładów: a) normalnego, b) beta, c) Weibulla

7. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych testów wśród badanych rozkładów nie stwierdzono istnienia rozkładu uprzywilejowanego. Wykazano w nich bowiem, że nie ma podstaw do odrzucenia sformułowanej hipotezy w odniesieniu do wszystkich przyjętych w badaniach analitycznych rozkładów hipotetycznych.

Przedstawiona w pracy procedura diagnostyczna nie stanowi konkurencji dla tradycyjnych, praktycznie zweryfikowanych i wszechstronnie opisanych teoretycznie metod diagnozowania typowych łożysk tocznych. Może ona natomiast stanowić uzupełnienie metod diagnostycznych użytecznych w badaniach łożysk specjalnych.

Możliwość stosowania oporów ruchu jako symptomu stanu istnieje na przykład tam, gdzie możliwe jest określanie oporów ruchu w węzle łożyskowym za pomocą tzw. metody wybiegu.

8. LITERATURA

- [1] Burakowski T., Marczak R., Senatorski J., Marczak M.: Znaczenie transformacji warstwy wierzchniej technologicznej w eksploatacyjną. *Tribologia* nr 5-6, 1997, str. 477-485.
- [2] Benjamin J.R., Cornell C.A.: *Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów*. Warszawa, WNT 1977.
- [3] Cempel Cz., Tomaszewski F. (redakcja): *Diagnostyka maszyn*. Radom, Wyd. MCNEMT 1992.
- [4] Greń J.: *Statystyka matematyczna, modele i zadania*. Warszawa, PWN 1982.
- [5] Nosal S.: *Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy nr 328. Poznań 1998.
- [6] Schagerr H.: Bearing Failure. *Automobile Engineer*, t.57, No. 8, 1967, str. 947-954.
- [7] Styp-Rekowski M.: Znaczenie cech konstrukcyjnych dla trwałości skośnych łożysk tocznych. *Wyd. Uczeln. ATR, seria Rozprawy z. 103*. Bydgoszcz 2001.
- [8] Styp-Rekowski M., Knopik L.: Polioptymalizacja łożysk tocznych uwzględniająca losowość wyników eksperymentu. *Zesz. Nauk. Politechniki Koszalińskiej* nr 28. Koszalin 2001, str. 407-414.

- [9] Waligóra W.: Odporność na zmęczenie powierzchniowe stali łożyskowej poddanej obróbce laserowej. Zesz. Nauk. Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy nr 302. Poznań 1994.
- [10] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Wyd. Uczeln. ATR. Bydgoszcz 1996.



Dr inż. Michał STYP-REKOWSKI – ur. 24 października 1946 roku w Bydgoszczy. Nauczyciel akademicki na Wydziale Mechanicznym Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Politechniki Gdańskiej. Zajmuje się szerokim spektrum zagadnień dotyczących specjalnych łożysk tocznych. Z tą tematyką związana była także praca doktorska obroniona w 1985 roku na Wydziale Mechanicznym Energetycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Autor ponad 80 oryginalnych prac z powyższego zakresu a także uwzględniających problematykę wpływu działalności technicznej człowieka - zwłaszcza w zakresie obróbek mechanicznych i erozyjnych – na środowisko.