PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH

Łódź,15-16 maja 1997 r.

POWRÓT

Jerzy Girtler
Wyższa Szkoda Morska w Szczecinie

TRWAŁOŚĆ I NIEZAWODNOŚĆ ŁOŻYSK NIEKONWENCJONALNYCH

SŁOWA KLUCZOWE

łożyska niekonwencjonalne, trwałość, niezawodność, proces Markowa, proces semimarkowski

STRESZCZENIE

Tak istotne cechy łożysk niekonwencjonalnych, jak trwałość i niezawodność mogą być określone dwoma sposobami, w zależności od tego czy zostaną uznane za obiekty techniczne dwustanowe, czy trójstanowe. W pierwszym przypadku przydatna jest klasyczna teoria niezawodności a w drugim teoria procesów semimarkowskich. Przedstawione wzory dotyczą drugiej z wymienionych możliwości.

WPROWADZENIE

Obciążenia łożysk są przypadkowe i z tego powodu nie można dokładnie przewidzieć ich wartości w dowolnej chwili czasu eksploatacji. Wynika to z nieuniknionych przypadkowych zmian czynników zewnętrznych oraz wzajemnych oddziaływań elementów ciernych łożyska i istniejącego między nimi smaru. Oznacza to, że obciążenie jest procesem stochastycznym, ciągłym w stanach i w czasie. Oczywiste jest zatem, że jego wartości w kolejnych chwilach są ze sobą silnie skorelowane. W przypadku jednak rozpatrywania obciążeń dowolnego łożyska w chwilach znacznie oddalonych od siebie o odstęp czasu (rozstęp) O, zależność miedzy nimi będzie mała i tym mniejsza im większą wartość przyjmie wspomniany rozstęp O [1, 3, 6, 9, 10, 15]. Oznacza to, że obciążenie łożysk jest procesem o przyrostach asymptotycznie niezależnych. Ze względu na to, że jego zmiany nie są monotoniczne, może być uznane za stacjonarne. Stanowi ono przyczynę pogarszania się stanu danego łożyska, wpływając istotnie na proces zużywania, który przebiega odmiennie przy różnych własnościach zarówno otoczenia bliskiego, jak i dalekiego [13]. Wobec tego proces zmiany szybkości zużywania $\upsilon_z(t)$ łożyska w czasie jego pracy może być również rozpatrywany jako proces stochastyczny stacjonarny i o malejącej zależności między wartościami υ_z (t_1) oraz $\upsilon_z(t_2)$, wraz ze wzrostem różnicy t_2-t_1, $(t_2>t_1)$. *Ze* względu na to, że wartość zużycia skumulowana w chwili t, może być wyrażona zależnością [17]

$$Z(t) = \int_0^t v_z(\tau)d\tau \tag{1}$$

można przyjąć iż przyrosty zużycia łożyska w poszczególnych jego stanach są przyrostami o małej, wzajemnej zależności i tym mniejszej im większy jest rozstęp Θ=t_2-t_1,. Oczywiste jest, że analizowanie zużycia danego rodzaju łożysk wymaga oszacowania wartości oczekiwanej zużycia, którą można wyrazić następująco:

$$E\{Z(t)\} = \int_0^t E\{v_z(\tau)\}d\tau \tag{2}$$

Srybkość zużywania $\upsilon_z(t)$, w przypadku każdego rodzaju łożyska, zależy od: jakości jego elementów, własności otoczenia bliższego (zwłaszcza smarów) oraz oddziaływań otoczenia dalszego, a tym samym temperatury, umocowania (w przypadku endoprotez) i oczywiście obciążenia (nacisku jednostkowego). Z zależności (1) i (2) wynika więc, że aczkolwiek zużycie rośnie z upływem czasu, to jednak czas nie może być dobrą jego miarą. Zużycie jednoznacznie charakteryzuje stan łożyska, a czas jego pracy - nie. Zatem można przyjąć następującą hipotezę: *stan dowolnego łożyska oraz czas jego trwania zależą istotnie od stanu, który ten stan poprzedzał a nie od stanów wcześniejszych i przedziałów czasu ich trwania dlatego, ponieważ jego obciążenie i implikowane przez nie zarówno szybkość, jak też przyrosty zużycia są procesami o wartościach asymptotycznie niezależnych.* Oznacza to, iż można opracować taki model procesu zmian stanów (istotnych dla użytkownika) każdego łożyska, aby czas trwania dowolnego jego stanu istniejącego w chwili z„ oraz stan możliwy do uzyskania w chwili τ_{n+1} nie były stochastycznie zależne od stanów, które zaszły wcześniej i przedziałów czasu ich trwania. Spełnienie tych warunków umożliwia zastosowanie teorii procesów semimarkowskich do określenia niezawodności i trwałości łożysk [7, 8].

MODEL PROCESU ZMIAN STANÓW ŁOŻYSKA

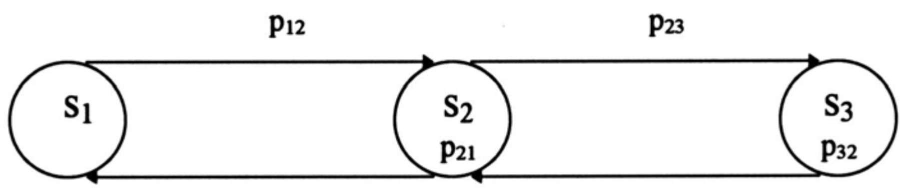
Proces zmian stanów dowolnego łożyska jest procesem losowym *{W*(t): t≥0)* o ciągłych, dodatnich i ograniczonych realizacjach. Dokonując dla potrzeb badawczych jego dyskretyzacji można w rezultacie rozpatrywać proces *(W(t): t≥0),* którego wartościami są istotne dla użytkownika elementy zbioru stanów $S=(s_1, s_2, s_3\}$ o następującej dla określonego rodzaju łożysk interpretacji [1, 2, 4, 5, 11, 12, 14, 16]:

s_1 - stan poprawnej pracy, w warunkach tarcia hydro lub elastohydrodynamicznego, w odniesieniu do endoprotezy stan pracy przy najkorzystniejszych warunkach tarcia i prawidłowej jej geometrii, natomiast w przypadku stawu biodrowego człowieka stan, w którym zużycie nie występuje lub jest niewielkie, w porównaniu ze zużyciem występującym w pozostałych stanach;

s_2 - stan pracy podczas występowania istotnych odkształceń sprężystych lub cieplnych i sprężystych odkształceń kadłubów łożysk dużych maszyn wirnikowych, stan pracy w warunkach tarcia mieszanego zwłaszcza półsuchego, a w przypadku endoprotez stan pracy przy zaburzeniu biomechaniki stawu i wzrostu obciążeń na kość, w której osadzony jest implant, zaś w odniesieniu do stanu biodrowego człowieka stan pracy przy wystąpieniu fizjologicznej niesprawności powodującej pogorszenie własności przeciwciernych mazi stawowej;

s_3 - stan pracy w przypadku występowania odkształceń plastycznych, przy odkształceniach powodujących zrywanie filmu olejowego, w warunkach tarcia technicznie suchego, natomiast w przypadku endoprotezy stan pracy przy zniszczeniu (nadmiernym zużyciu lub pęknięciu) panewki lub zaniku łożyska kostnego i obluzowania komponentów endoprotezy, zaś w odniesieniu do stawu biodrowego człowieka stan pracy przy zmianach chorobowych niekorzystnie wpływających na procesy tribologiczne lub z zaawansowanym spluszowaceniu chrząstki stawowej, nadmiernym obciążeniu.

Z własności Darboux funkcji ciągłych wynika, że proces $(W(t)\colon t \geq 0)$ przyjmuje wartości ze zbioru S według grafa zmian stanów przedstawionego na rys. 1. Stany $s_i \in S(i=1,\ 2,\ 3)$ trwają w przedziałach czasu $[\tau_0\ \ \tau_1]$, $[\tau_1\ \ \tau_2]$, ..., $[\tau_n\ \ \tau_{n+1}]$, ..., które są zmiennymi losowymi o dodatnio skoncentrowanych rozkładach, czyli rozkładach skoncentrowanych w zbiorze liczb rzeczywistych nieujemnych. Zmienne te mogą być rozpatrywane jako T_i; $i=1,\ 2,\ 3$, oznaczające przedziały bezwarunkowego czasu trwania poszczególnych stanów $s_i \in S$ $(i=1,\ 2,\ 3)$ oraz jako T_{ij}; $i,\ j=1,\ 2,\ 3$, oznaczające przedziały czasu trwania każdego z tych stanów pod warunkiem, że następnym stanem będzie jeden z pozostałych. Można się spodziewać, że wspomniane zmienne losowe mają rozkłady dowolne, a nie tylko wykładnicze. Wobec tego $(W(t)\colon t \geq 0)$ o grafie zmian stanów przedstawionym na rys. 1. jest procesem semimarkowskim.



Rys. 1. Graf zmian stanów $s_i \in S$ $(i=1,\ 2,\ 3)$ procesu $(W(t)\colon t \geq 0)$ p_{ij} - prawdopodobieństwa przejścia tego procesu z jednego stanu do innego, $i \neq j;\ i,j=1,\ 2,\ 3.$

Proces ten jest całkowicie określony ponieważ, jak wynika z grafa przedstawionego na rys. 1, jego macierz funkcyjna jest następująca

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12}(t) & 0 \\ Q_{21}(t) & 0 & Q_{23}(t) \\ 0 & Q_{32}(t) & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

zaś rozkład początkowy ma postać

$$p_i = P\{W(0) = s_i\} = \begin{cases} 1 & dla \quad i = 1 \\ 0 & dla \quad i = 2,\ 3 \end{cases} \tag{4}$$

Badanie realizacji takich procesów dla poszczególnych rodzajów łożysk umożliwia określenie elementów macierzy (3), których interpretacja jest następująca:

$$Q_{ij}(t) = P\{W(\tau_{n+1}) = s_j,\ \tau_{n+1} - \tau_n < t \,/\, W(t) = s_i\},\ i,j = 1,2,3;\ i \neq j \tag{5}$$

W procesie $(W(t): t \geq 0)$ wielkości losowe T_i $(i=1, 2, 3)$ są zmiennymi niezależnymi o skończonych, dodatnich wartościach oczekiwanych i dowolnych rozkładach, absolutnie ciągłych, określonych przez funkcje gęstości $f(t)$.

ROZWIĄZANIE PROBLEMU

Z teorii procesów semimarkowskich wynika, że ciąg zmiennych losowych $\{W(\tau_n); n \in 0, 1, 2, 3, ...\}$, jest jednorodnym łańcuchem Markowa, włożonym w proces $(W(t): t \geq 0)$ [8] o jednoznacznej macierzy prawdopodobieństw przejścia, wynikającej z jądra procesu (3), która jest następująca:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Rozkłady zmiennych losowych T_j $(j=1, 2, 3)$ są interpretowane następująco:

$$G_j(t) = P\{T_j \leq t\} = P\{\tau_{n-1} - \tau_n \leq t / W(\tau_n) = s_i\} = \sum_{j=1}^{3} Q_{ij}(t); \; j = 1, 2, 3 \tag{7}$$

Proces $(W(t): t \geq 0)$ ma rozkład graniczny $P_j = \lim\limits_{t \to \infty} \{W(t) = s_j\}$, $j = 1, 2, 3$, ponieważ jest on nieprzywiedlny [8] a wspomniane zmienne losowe $T_j (j=1, 2, 3)$ mają skończone dodatnie wartości oczekiwane $E(T_j)$. Rozkład ten można wyznaczyć posługując się następującym wzorem [8]:

$$P_j = \frac{\pi_j E(T_j)}{\sum_{k=1}^{3} \pi_k E(T_k)}, \; i,j = 1, 2, 3 \tag{8}$$

przy czym $\pi_j = \lim\limits_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} P\{W(\tau_k) = s_j / W(0) = s_i\}; \; s_i, s_j \in S, \; j=1, 2, 3$

jest rozkładem granicznym łańcucha $\{W(\tau_n); n \in 0, 1, 2, ...\}$ włożonego w proces $(W(t): t \geq 0)$ Rozkład ten spełnia następujący układ równań:

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{3} \pi_i p_{ij} = \pi_j, \quad i,j = 1, 2, 3 \\ &\sum_{i=1}^{3} \pi_i = 1 \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Rozwiązując układ równań (9) z uwzględnieniem macierzy (6) można uzyskać następujące wzory:

$$\pi_1 = \frac{p_{21} p_{32}}{L}, \; \pi_2 = \frac{p_{32}}{L}, \; \pi_3 = \frac{p_{23}}{L} \tag{10}$$

gdzie: $L = p_{23} + p_{32} + p_{21} p_{32}$

Korzystając ze wzoru (8) otrzymuje się zależności:

$$P_1 = \frac{p_{21} p_{32} E(T_1)}{M}, \; P_2 = \frac{p_{32} E(T_2)}{M}, \; P_3 = \frac{p_{23} E(T_3)}{M} \tag{11}$$

gdzie: $M = p_{21} p_{32} E(T_1) + p_{32} E(T_2) + p_{32} E(T_3)$

Poszczególne prawdopodobieństwa $P_j(j=1, 2, 3)$ określone zależnościami (11) mają następującą interpretację:

$$P_1=P\{W(t)=s_1, t\to\infty\}, P_2=P\{W(t)=s_2, t\to\infty\}, P_3=P\{W(t)=s_3\} \tag{12}$$

W wyniku badania realizacji procesu $(W(t): t\geq0\}$ można wyznaczyć liczby n_{ij} oznaczające ilość zmian wartości tego procesu z s_i na s_j w dostatecznie długim przedziale czasu $[0, t_n]$ oraz uzyskać wartości $t_{ij}^{(m)}(m=1, 2, 3, ..., n_{ij})$ zmiennych losowych T_{ij} oznaczających przedziały czasu trwania stanu s_i tego procesu pod warunkiem, że następnym jego stanem będzie s_j. Pierwszy rodzaj informacji jest niezbędny do oszacowania nieznanych prawdopodobieństw p_{ij}. Oszacowaniami takimi są wartości

$$\hat{p}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^{3} n_{ij}} \quad \textbf{statystyki} \quad \hat{P}_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{i=1}^{3} N_{ij}} \tag{13}$$

będącej estymatorem największej wiarygodności prawdopodobieństwa przejścia p_{ij}. Z kolei drugi rodzaj informacji umożliwia oszacowanie wartości oczekiwanych $E(T_j)\equiv(T_i)$ ponieważ istnieją następujące zależności między wartościami przeciętnymi rozpatrywanych losowych:

$$E(T_i) = \sum_{j=1}^{3} p_{ij} E(T_{ij}), \; i = 1, 2, 3 \tag{14}$$

Estymacja wartości oczekiwanych $E(T_j)(j = 1, 2, 3)$ zmiennych losowych T_j może być punktowa lub przedziałowa. Zastosowanie estymacji punktowej pozwala na bardzo proste oszacowanie $E(T_j)$ bo w formie średniej arytmetycznej $\bar{t}_j$ $(j = 1, 2, 3)$. Nie umożliwia ona jednak określenia dokładności oszacowania $E(T_j)$. Wyznaczenie takiej dokładności jest możliwe w przypadku zastosowania estymacji przedziałowej, w której oszacowany zostaje przedział ufności, czyli taki przedział $(t_j^{(d)}, t_j^{(g)})$ o losowych końcach, który z określonym prawdopodobieństwem β (nazywanym poziomem ufności) zawiera nieznaną wartość oczekiwaną $E(T_j)$.

W przypadku, gdy istotna jest niezawodność i trwałość łożysk w długim odcinku czasu mogą być wykorzystywane do podejmowania decyzji zależności (14) określające $E(T_1)$ oraz $E(T_2)$ jako miary trwałości i zależności (11) określające prawdopodobieństwa P_1 oraz P_2 jako miary niezawodności. Gdy istotna jest wyłącznie praca łożyska w stanie s_1 niezawodność łożyska określa P_1, a trwałość $E(T_1)$. Natomiast P_2 określa niezawodność a $E(T_2)$ łożyska, gdy dopuszczalna jest jego praca w s_2, jeżeli znajdzie się już w tym stanie. W sytuacjach, w których satysfakcjonująca jest praca łożyska w jednym z dwu wymienionych stanach, zarówno jego niezawodność i trwałość można odpowiednio określić z zależności (15) i (16):

$$P_{1\cup2}=P_1+P_2 \tag{15}$$

$$E(T_1+T_2)=E(T_1)+E(T_2) \tag{16}$$

Określenie niezawodności łożysk $R(t)=P(T>t;\ \Phi,\ W)$ dla dowolnego czasu t ich pracy zgodnie z przeznaczeniem Φ i w warunkach W (do których zostały przysposobione w fazie projektowania i wytwarzania) jest możliwe tylko w tym przypadku, gdy znane są rozkłady przedziałów przebywania procesu $(W(t): t\geq 0\}$ w wyróżnionych stanach $s_i \in S$ $(i=1, 2,$ 3).

PODSUMOWANIE

Wzory umożliwiające określenie niezawodności i trwałości łożysk zostały wyprowadzone wskutek wykorzystania rozkładu granicznego semimarkowskiego procesu $(W(t): t\geq 0\}$. Rozkład ten jest łatwiej wyznaczyć niż rozkład chwilowy, który stanowią funkcje $P_kE(t)(k=1, 2,$ 3), oznaczające prawdopodobieństwa tego, że w dowolnej chwili t proces ten będzie w stanie $s_i \in S$ $(i=1, 2,$ 3). Rozkład taki można wyznaczyć wykorzystując rozkład początkowy (4) wspomnianego procesu oraz funkcje $P_{ij}(t)$ oznaczające prawdopodobieństwa warunkowe, nazywane prawdopodobieństwami przejścia tego procesu ze stanu s; do stanu s_j $(s_i, s_j \in ES, i\, j=1, 2, 3; i\neq j)$. Obliczenie tych prawdopodobieństw polega na rozwiązaniu układu równań całkowych Voltery drugiego rodzaju [8], w których (w tym przypadku) wielkościami znanymi są elementy macierzy funkcyjnej (3).

W ogólnym przypadku, gdy liczba stanów jest niewielka a macierz funkcyjna - stosunkowo nieskomplikowana w sensie matematycznym, to wspomniany układ można rozwiązać operatorowo, w oparciu o transformację Laplace'a - Stieltjesa. Większa liczba stanów lub bardziej złożona macierz stochastyczna powodują, że układ taki można rozwiązać jedynie w sposób przybliżony, w wyniku zastosowania odpowiedniej procedury numerycznej.

Zaproponowany proces semimarkowski jest najprostszym modelem zmian istotnych stanów łożysk. Odzwierciedla on własności podobne różnych łożysk takich jak: małogabarytowych pasywnych i aktywnych łożysk magnetycznych, łożysk poprzecznych i wzdłużnych stosowanych w maszynach (także dużych wirnikowych), łożysk z warstwami ceramicznymi i innych, a także węzłów tarcia stosowanych w endoprotezach stawu biodrowego oraz tak szczególnego węzła tarcia jakim jest naturalny staw biodrowy człowieka. Zrozumiałe jest, że model ten może być zmodyfikowany w zależności od potrzeb wynikających z przyjętych celów utylitarnych i (lub) poznawczych w badaniach dotyczących każdego z wymienionych rodzajów łożysk.

Przedstawiony model procesu zmian stanów łożysk jest procesem semimarkowskim o skończonym zbiorze stanów i ciągłym w czasie.

Procesy semimarkowskie jako modele rzeczywistych procesów zmian stanów łożysk są bardziej przydatnymi w praktyce niż procesy Markowa. Wynika to z tego, ze procesy semimarkowskie o ciągłym parametrze czasu i skończonym zbiorze stanów cechują się tym iż przedziały czasu przebywania tych procesów w poszczególnych stanach są zmiennymi losowymi o dowolnych rozkładach skoncentrowanych w zbiorze liczb rzeczywistych nieujemnych. To odróżnia je od procesów Markowa, których wspomniane przedziały czasu są zmiennymi losowymi o rozkładach wykładniczych. Przydatność tego rodzaju rozkładów byłaby wtedy, gdyby: zmiany stanu technicznego łożysk były nieodwracalne, nie zachodziły uszkodzenia wynikające z istnienia procesów zużywania (co oznaczałoby, że ich poziom własności wytrzymałościowych jest niezmienny) lecz były one rezultatem zewnętrznych oddziaływań (obciążeń) udarowych. Dla maszyn z łożyskami o wykładniczym rozkładzie czasu poprawnej pracy w wyróżnionych stanach nie mają sensu wymiany profilaktyczne, a jedynym sposobem podwyższenia ich niezawodności jest poprawa własności ich łożysk w fazie projektowania i wytwarzania oraz zmniejszenie obciążeń.

Istotną korzyścią ze stosowania procesów semimarkowskich (podobnie jak w przypadku korzystania z procesów Markowa) jest to, że są dostępne profesjonalne narzędzia komputerowe, umożliwiające rozwiązywanie różnych układów równań stanów dla tego rodzaju modeli procesów rzeczywistych. Stosunkowo więc łatwo można wyznaczyć, przydatne w eksploatacji, charakterystyki probabilistyczne nie tylko łożysk.

LITERATURA

1. Burcan **J.,** Krzanowski K., Kuncman S.: Metody i wyniki badań miniaturowych układów łożyskowych. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1993, s. 22-28.
2. Burcan J.: Bio-ergonomiczne uwarunkowania pracy węzłów tarcia aparatury i sprzętu rehabilitacyjnego. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Lódzka 1993, s. 74-80.
3. Burcan J., Lewandowski J.: Wykorzystanie analizy luzów łożyskowych w profilaktyce stanów awaryjnych maszyn. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1995, s. 107-112.
4. Bąbrowski L., Olszewski O., Wasiluk M.: Wykorzystanie odkształceń w hydrodynamicznych łożyskach wzdłużnych. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1993, s. 38-45.
5. Dąbrowski J.R.: Aspekty tńbologiczne w endoprotezoplastyce. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1993, s. 63-69.
6. Girtler J.: Proces semimarkowski jako model procesu zużycia ślizgowych układów trybologicznych silników spalinowych. XVIII Jesienna Szkota Tńbologiczna. Zjawiska w strefie tarcia, cz. II. MCNMT, Radom 1992, s. 49-54.
7. Girtler J.: Możliwość zastosowania i przydatność procesów semimarkowskich jako modeli procesów eksploatacji maszyn. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 3, (1996), s. 125-134.
8. Grabski F.: Teońa semi-markowskich procesów eksploatacji obiektów technicznych. Rozprawa habilitacyjna. Zeszyty Naukowe WSMW, nr 75A, Gdynia 1982.
9. Jankowska J.: Analiza Metrologiczna wyników badań na przykładzie łożysk ślizgowych. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1995, s. 28-32.
10. Kiciński J.: Niekonwencjonalne metody obliczania węzłów łożyskowych. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1995, s. l 1-20.
11. Korzyński M., Cwanek J.: Zjawiska zużycia w stawie biodrowym człowieka. Zbiór prac konfrencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1993, s. 70-73.
12. Korzyński M., Cwanek J.: Próba komputerowej symulacji pracy stawu biodrowego. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1995, s. 126-130.
13. Leszek W.: Metodologiczne podstawy badań trybologicznych.PWN, Warszawa-Poznań 1981. 14. Paściak M., Doniec J., Wąsik **R.:** Mateńałowe powikłania endoprotezoplastyki stawu biodrowego. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1995, s. 131-134.
15. Rymuza Z.: Mikrotożyska. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1995, s. 21-27.
16. Szczerek M., Wiśniewski M.: Warstwy ceramiczne w układach łożyskowych. Zbiór prac konferencyjnych. Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych. Politechnika Łódzka 1993, s. 51-58.
17. Wybrane zagadnienia zużywania się mateńałów w ślizgowych węzłach maszyn. Praca zbiorowa pod red. W. Zwierryckiego. PWN, Warszawa-Poznań 1990.

LIFE AND RELIABILITY OF UNCONVENTIONAL BEARINGS

Summary Such fundamental attributes of the unconventional beazings as life and reliability can be defined by two methods. One of the methods concerns bearings as two-state technical objects and the second one bearings as three-state technical objects. In the first cale the classical theory of reliability is useful and in the second cale - the theory of semi-Markov processes. The paper contains mathematical formulas concenying only the second cale.

Recenzent Prof. dr hab. inż. Jan Burcan