

MICHAŁ LIBERA*, WŁODZIMIERZ WALIGÓRA*

Estymacja początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych w pojazdach samochodowych na podstawie badań eksploatacyjnych

Słowa kluczowe

Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa, łożyska toczne, niezawodna praca.

Keywords

Rolling contact fatigue, roller bearings, reliability work.

Streszczenie

Celem przedstawionych w artykule rozważań jest pokazanie sposobu wyznaczania okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych w pojazdach samochodowych w oparciu o informacje z serwisowych stacji obsługi.

Aktualnie stosowany sposób doboru łożysk tocznych nie uwzględnia początkowego okresu niezawodnej pracy, którego istnienie wykazano w artykule na podstawie stanowiskowych badań trwałości łożysk tocznych i ich elementów.

Stanowiskowe badania trwałości (pełne lub skrócone) nie dają informacji o rzeczywistym zachowaniu się łożysk w eksploatacji i tym samym wyniki ich analizy nie są dostateczną przesłanką do zmiany procedury doboru łożysk tocznych. Informację o rzeczywistym zachowaniu się łożysk w eksploatacji można uzyskiwać z serwisowych stacji obsługi. Tego rodzaju dane zawierają informacje o trwałości (przebiegu w km do wystąpienia pittingu) łożysk z konkretnej grupy samochodów bez znajomości liczności tej grupy (populacji).

W artykule zaproponowano metodykę analizy danych, pozwalającą na estymację początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych na podstawie wrywkowych badań eksploatacyjnych.

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3, tel.: 665-22-23, fax.: 665-27-36, e-mail: wlodzimierz.waligora@put.poznan.pl, e-mail: michal.libera@put.poznan.pl.

1. Wprowadzenie

Procedury doboru łożysk tocznych w węzłach maszyn i urządzeń są praktycznie niezmiennie od chwili sprecyzowania ich przez A. Palmgrena już w latach 40. ubiegłego wieku. Zakładają one, że trwałość tych łożysk (warunkowana zjawiskami zmęczenia powierzchniowego) opisywana jest dwuparametrowym rozkładem Weibulla, mimo iż już wcześniej ten uczyony stwierdził, że do tego opisu stosowany winien być rozkład trójparametrowy.

W trójparametrowym rozkładzie Weibulla zakłada się, że każdy badany element ma pewien początkowy okres niezawodnej pracy.

Wydaje się, że w procedurze doboru łożysk tocznych do węzłów maszyn ten początkowy okres niezawodnej pracy winien być uwzględniony. Jednakże dla opracowania takiej procedury należy przede wszystkim poznać wartość tego początkowego okresu.

Producenci łożysk tocznych kontrolują swoje produkty m.in. poprzez ocenę ich trwałości wyznaczonej w trakcie badań stanowiskowych. Badania takie nie uwzględniają rzeczywistych warunków pracy łożysk tocznych. Aby uzyskać w pełni wiarygodne informacje, należy dokonać obserwacji łożysk tocznych podczas ich rzeczywistej eksploatacji.

Celem przedstawionych w artykule rozważań jest pokazanie sposobu wyznaczania początkowego okresu niezawodnej pracy w pojazdach samochodowych w oparciu o informacje możliwe do uzyskania z serwisowych stacji obsługi. W stacjach tych można otrzymać dane o powierzchniowej trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych, ale tylko tych, w których to zmęczenie wystąpiło. Nie jest natomiast znana liczba wszystkich pracujących w pojazdach samochodowych łożysk tocznych

2. Dobór łożysk tocznych w pojazdach samochodowych

Podstawą obliczeń wielkości łożyska tocznego jest zależność między żadaną trwałością L , katalogową nośnością dynamiczną (ruchową) C i rzeczywistym obciążeniem łożyska F opisana wzorem (1):

$$L = \left(\frac{C}{F} \right)^p \quad (1)$$

w którym:

- L – zakładana trwałość łożyska w milionach obrotów [mln obr],
- C – nośność dynamiczna (wg katalogu) [N],
- F – równoważne obciążenie dynamiczne [N],
- p – wykładnik potęgowy: dla łożysk kulkowych $p = 3$, a dla wałeczkowych $p = 10/3$.

Nośność dynamiczna podana w katalogu dla poszczególnych łożysk jest obciążeniem, przy którym 90% spośród badanych łożysk wykona co najmniej 1 milion obrotów.

Procedura doboru łożysk tocznych przodujących producentów poza nośnością dynamiczną do równania trwałości wprowadza jeszcze dodatkowe współczynniki zależne od oczekiwanego poziomu niezawodności a_1 , rodzaju materiału a_2 i warunków tarcia a_3 [1]

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{F} \right)^p \quad (2)$$

gdzie:

- L_{na} – trwałość zmodyfikowana (efektywna) [mln obr],
indeks n oznacza różnicę między niezawodnością wymaganą i 100-procentową,
- a_1 – współczynnik niezawodności,
- a_2 – współczynnik materiałowy,
- a_3 – współczynnik zależny od warunków pracy (szczególnie od smarowania).

Tabela 1. Wartości współczynnika niezawodności dla różnych poziomów niezawodności [1]

Table. 1. Reliability factor a_1 [1]

Niezawodność ϕ %	90	95	96	97	98	99	100
L_{na}	L_{10a}	L_{5a}	L_{4a}	L_{3a}	L_{2a}	L_{1a}	L_0
a_1	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21

W zależności od założonego poziomu niezawodności zmniejsza się efektywna trwałość łożyska (dla 90% $a_1 = 1$), co przedstawiono w tab. 1. Dane z powyższej tabeli (poza ostatnią kolumną) zawarte są w większości katalogów łożysk tocznych, a wartości współczynnika a_1 obliczone są na podstawie rozkładu dwuparametrowego Weibulla. Tylko nieliczne publikacje [2] podają wartość współczynnika a_1 dla niezawodności 100%. Jest to wartość oszacowana przez Weibulla równa 0,05.

3. Początkowy okres niezawodnej pracy łożysk tocznych

Okres zdatności prawidłowo zaprojektowanych i eksploatowanych węzłów tocznych determinuje zjawisko powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Tak więc przekonanie użytkowników, że do pewnego okresu pracy łożyska toczne

muszą być niezawodne, jest uzasadnione choćby tym, że aby wystąpiło zmęczenie powierzchniowe, poszczególne fragmenty elementów łożysk muszą być poddane pewnej liczbie obciążeń, co może nastąpić dopiero po pewnym okresie pracy. Wieloletnie badania trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych wykazują, że każde łożysko przez pewien początkowy okres pracy jest niezawodne.

Weibull [3], który pierwszy w latach czterdziestych ubiegłego wieku zaproponował formuły matematyczne do statystycznego opisu trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych uznał, że ten początkowy okres niezawodnej pracy L_0 jest stałą częścią trwałości nominalnej łożysk tocznych i wynosi:

$$L_0 = 0,05L_{10} \quad (3)$$

To założenie powodowało, że rozkład Weibulla trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych winien mieć postać trójparametrową:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-E}{A}\right)^B\right] \quad \text{dla } t < E \quad F(t) = 0 \quad (4)$$

gdzie:

- $F(t)$ – dystrybuanta rozkładu Weibulla,
- t – trwałość badanych łożysk,
- A – parametr skali,
- B – parametr kształtu,
- E – parametr progowy (wg Weibulla [3] równy $0,05 L_{10}$).

Obliczanie wartości parametrów trójparametrowego rozkładu Weibulla było utrudnione do czasu szerokiego wprowadzenia technik komputerowych. We wszystkich katalogach podawane są nadal procedury doboru łożysk tocznych do konkretnych węzłów maszyn, nie uwzględniające tej postaci rozkładu Weibulla, lecz opierające się na postaci dwuparametrowej tego rozkładu:

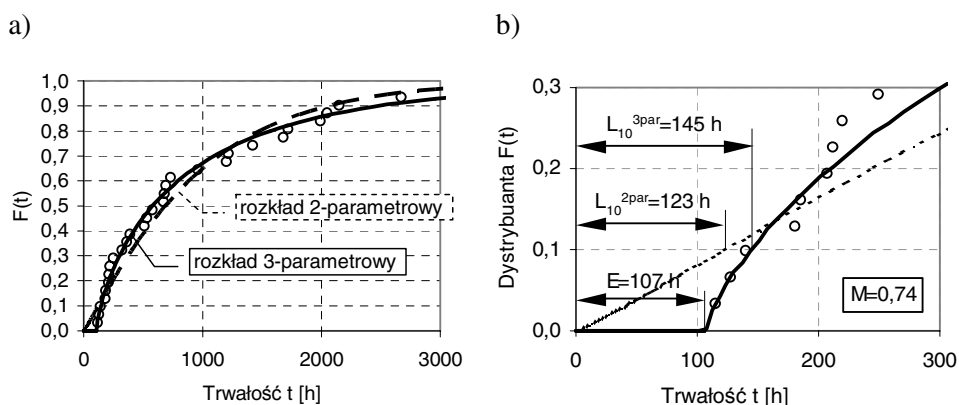
$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{A}\right)^B\right] \quad (5)$$

W przypadku takiego opisu trwałości zmęczeniowej łożysk tocznych zakłada się, że mogą zdarzać się łożyska, których trwałość zmęczeniowa będzie równa zero, co stoi w sprzeczności z logiką i założeniem Weibulla. Wynika z tego dalej, że stosując się do zaleceń przedstawianych w katalogach łożysk tocznych, gubi się ważny dla praktyki fakt występowania początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych (przez Weibulla określany jako L_0 , czyli stała część trwałości nominalnej L_{10}).

Dla oceny początkowego okresu niezawodnej pracy konieczne jest wyznaczenie wartości parametru E . Jednakże dopiero stosunek parametru E do trwałości umownej L_{10} , określający, jaka początkowa część L_{10} (czyli trwałości nominalnej) jest okresem niezawodnej pracy, może być użyteczny dla konstruktorów maszyn. Stosunek ten proponuje się oznaczyć symbolem M .

$$M = \frac{E}{L_{10}} \quad (6)$$

Na wykresie (rys. 1) przedstawiono przykładowo wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej opisaną funkcją dystrybuanty dwu- i trójparametrowego rozkładu Weibulla. Okres niezawodnej pracy, wynosi w tym przypadku 0,74 trwałości L_{10} (czyli znacznie więcej niż sugerował Weibull).



Rys. 1. Przykładowe wyniki badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej opisaną funkcją dystrybuanty dwuparametrowego (linia przerywana) i trójparametrowego (linia ciągła) rozkładu Weibulla: a) pełna funkcja dystrybuanty, b) początkowy fragment przebiegu funkcji dystrybuanty (opracowanie własne wyników badań z pracy [4])

Fig. 1. Two- and three-parameters Weibull distribution function for examples of surface fatigue life results

W tab. 2 zestawiono wyniki obliczeń dla trwałości innych łożysk i próbek pochodzących od różnych producentów i wyprodukowanych w różnych latach – badanych na odpowiednich stanowiskach. We wszystkich przypadkach wartość parametru M jest znacznie większa od sugerowanej przez Weibulla (0,05).

Obliczone wartości M (czyli stosunku E do L_{10}) nasuwają wiele pytań, np. o to, czy poprawa technologii spowodowała zmianę M , a także od czego zależy ta wartość, np. czy wartość tego parametru zależy od obciążenia lub kształtu powierzchni styku elementów tocznych i pierścieni.

Tabela 2. Wartości stosunku E/L_{10} łożysk tocznych, ich elementów i próbek
 Table. 2. Relationship E/L_{10} for roller bearings and their elements

Badany obiekt	Rok badań	Stosunek E/L_{10}	Literatura	
Łożyska	NJ204	1978	0,740	[4]
	NJ204	1978	0,235	[4]
	NJ204	1978	0,546	[4]
	NJ204	1978	0,729	[4]
	32211	1969	0,27	[5]
	32211	1969	0,573	[5]
	32211	1969	0,768	[5]
	32211	1969	0,946	[5]
	6309	1963	0,176	[6]
	NJ312	1979	0,183	[7]
	NJ312	1979	0,571	[7]
	NJ312	1979	0,524	[7]
	CRB500	2000	0,870	SKF
	6204	1991	0,582	VUT
Waleczki	NU309	1979	0,269	[8]
	NU309	1998	0,348	[9]
Próbki		1999	0,707	[10]
		1999	0,755	[10]
		1993	0,712	[11]

Jednakże podstawowe pytanie brzmi: czy stosunek E/L_{10} ma równie wysokie wartości dla łożysk pracujących w warunkach rzeczywistych.

4. Metoda oceny początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych na podstawie informacji z serwisów

Prowadzone są dwa rodzaje badań laboratoryjnych powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, w tym trwałości łożysk tocznych: tzw. badania „pełne” oraz badania „skrócone”.

W badaniach „pełnych” wszystkie badane obiekty (łożyska toczne, ich elementy lub próbki) pracują aż do wystąpienia pittingu, czyli dla każdego z nich wyznaczana jest powierzchniowa trwałość zmęczeniowa. Są one podstawowym rodzajem badań, gdyż umożliwiają wyznaczenie przebiegu krzywej niezawodności badanych obiektów z analizowanej partii. W przypadku badania kompletnych łożysk tocznych przyjmuje się, że licznosc partii łożysk wynosi co najmniej 20 szt. [12].

Podstawowym celem drugiego rodzaju badań, czyli badań „skróconych” jest kontrola czy 90% spośród badanych łożysk osiąga trwałość nominalną L_{10} .

Badania skrócone realizować można w dwóch wariantach. W pierwszym z nich wszystkie łożyska z badanej partii pracują na stanowiskach tylko do momentu osiągnięcia czasu pracy równego trwałości nominalnej. W takich badaniach wystarczy, aby 90% łożysk z badanej partii przepracowało czas równy trwałości nominalnej, aby można je uznać za spełniające warunki katalogowe. Dla realizacji drugiego z wariantów badań „skróconych” wymagane jest posiadanie takiej ilości stanowisk badawczych, aby można było rozpocząć równocześnie badania co najmniej 20 łożysk tocznych lub 20 ich elementów lub próbek. W tym przypadku prowadzone są równocześnie badania wszystkich obiektów. W przypadku badania łożysk tocznych, jeżeli spośród 20 na trzech łożyskach wystąpiło wykruszenie zmęczeniowe, to badania można przerwać, gdyż czas pracy (lub ilość obrotów), które przepracowało drugie z tych najkrócej pracujących łożysk, winien być większy niż wyznaczona dla stosowanych warunków pracy trwałość nominalna.

Stosowana w przemyśle łożyskowym norma przewiduje możliwość prowadzenia dłużej tego rodzaju badań. Zakłada się możliwość prowadzenia badań aż do pittingu 5. i 10. łożyska spośród najkrócej pracujących, co umożliwi precyzyjniejszą ocenę trwałości nominalnej a przez to umożliwi dokonanie oceny wpływu na tę wielkość różnych czynników czy to konstrukcyjnych, czy materiałowych.

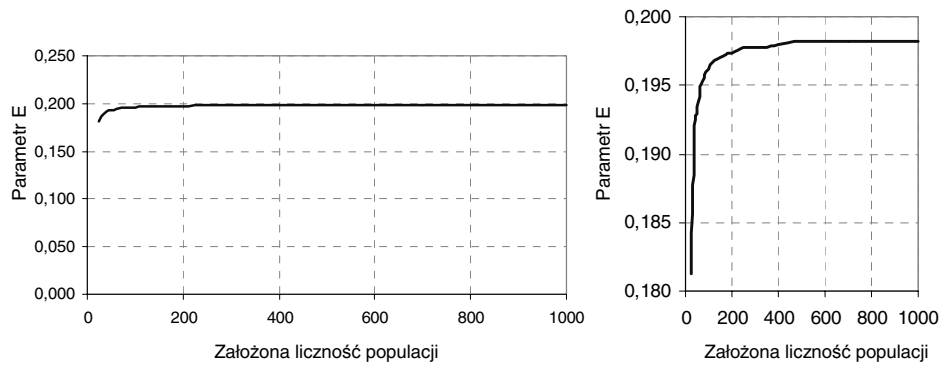
Dane, które można pozyskać z serwisów samochodowych, wykazują pewne podobieństwo do wyników badań skróconych – mianowicie są to informacje o przebiegach tych łożysk, które uległy uszkodzeniu – jednak nie jest znana liczba wszystkich pojazdów, które posiadają łożyska określonego typowymiaru (gdyż pojazdy, w których łożyska nie uległy uszkodzeniu, nie są ewidencjonowane).

W związku z tym, by móc estymować okres niezawodnej pracy łożysk tocznych na podstawie wrywkowych badań eksploatacyjnych, należy sprawdzić, w jakim stopniu wartość parametru E (decydującego o okresie niezawodnej pracy) zależy od przyjętej liczebności populacji badanych pojazdów.

W tym celu dla różnych zbiorów wyników badań trwałości łożysk tocznych obliczano wartość parametru E w szerokim zakresie zmieniając domniemaną liczebność populacji badanych łożysk. Przykładowy przebieg zmian wartości parametru E spowodowany zmianą założonej liczebności populacji przedstawiono na rys. 2.

Dane, na podstawie których stworzono wykresy przedstawione na rys. 2 dotyczą wyników stanowiskowych badań trwałości łożysk walcowych NJ204. Rzeczywista liczebność badanych łożysk wynosiła 30, a parametr $E = 0,181$ tys. godz. Przyjęcie, że liczebność badanych łożysk wynosiła 1000 spowodowałoby, że początkowy okres niezawodnej pracy E wyniósłby 0,207 tys. godzin.

Podobną analizę przeprowadzono dla łożysk kulkowych 6204, łożysk walcowych i NJ312 oraz łożysk stożkowych 32211, a także elementów tocznych (wałeczków) łożysk NU309 i próbek cylindrycznych badanych na specjalnym stanowisku. W analizie tej założono, że liczebność próbek zwiększona zostaje



Rys. 2. Wykres wartości parametru E w zależności od założonej liczności populacji dla wyników badań trwałości łożysk walcowych NJ204 [4]

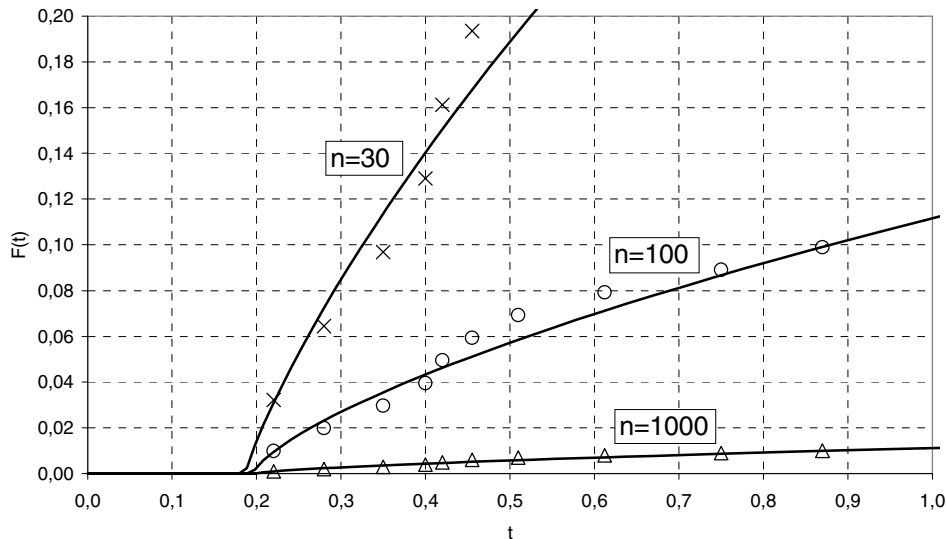
Fig. 2. Chart of E parameter value vs supposed population numbers for bearing NJ204 life

z rzeczywistej ilości na 100 oraz 1000 sztuk. Uzyskane wartości początkowego okresu niezawodnej pracy E dla tych przypadków przedstawiono w tab. 3. Wynika z nich, że wraz ze wzrostem przyjętej liczności próbek zawsze rośnie wartość parametru E , co zobrazowano na rys. 3. Wzrost ten jest jednak nieznaczny.

Tabela 3. Wartości parametru E obliczone dla różnych domniemanych liczności populacji
Table 3. Value E parameter for supposed numbers of population

Badany obiekt		Rzeczywista liczność próbki n	Rzeczywista wartość parametru E	Wartość parametru E dla liczności $n=100$	Wartość parametru E dla liczności $n=1000$	Literatura
Łożyska	NJ204	30	0,181	0,205	0,207	[4]
	NJ312	50	88,1	117,8	123,5	[7]
	32211	20	189,2	193,1	193,1	[5]
	6204	21	218,1	240,9	243,5	VUT
Wałeczki	NU309	43	1,96	2,25	2,33	[9]
Próbki		60	74,1	76,3	76,4	[10]

Na rys. 3 przedstawiono początkowy fragment przebiegu funkcji dystrybucyjnej rozkładu Weibulla w układzie liniowym dla trzech domniemanych liczności dla tej samej grupy wyników. Obrazuje on fakt, iż wraz ze zwiększaniem liczności zwiększa się wartość parametru E . Wzrost ten jest jednak bardzo nieznaczny.



Rys. 3. Początkowy fragment przebiegu funkcji dystrybuanty rozkładu Weibulla w układzie liniowym dla wyników badań trwałości łożysk NJ204 [4], przy założeniu, że licznosc wynosi: 30, 100 i 1000

Fig. 3. Initial part of Weibull distribution function in linear axis for life results of NJ204 bearings, for supposed population number equals: 30, 100 and 1000

Na podstawie powyższej analizy sformułować można dwa spostrzeżenia:

- założona licznosc nie ma decydującego wpływu na wartość parametru E ,
- im większa założona licznosc, tym większa wartość parametru E .

Spostrzeżenia te pozwalają sformułować wniosek, iż wartość parametru E obliczona dla danych wrywkowych potraktowanych jako dane pełne obarczona będzie **niedoszacowaniem** (rzeczywista wartość będzie z pewnością większa) nieprzekraczającym 10%.

Tak więc na podstawie analizy wyników badań wrywkowych, pochodzących z dokumentacji serwisów, można szacować wartość parametru E . Poniżej zamieszczono wyniki takich obliczeń dla łożysk stożkowych CBK-088 stosowanych w piastach kół przednich samochodu Polonez. Odnotowane przez serwis przebiegi do uszkodzenia dla 31 łożysk wynosiły [km]: 3 450, 4 328, 4 980, 6 976, 7 036, 7 039, 9 233, 9 550, 10 750, 11 200, 13 123, 13 888, 20 209, 21 090, 21 214, 26 589, 30 328, 34 000, 36 216, 36 855, 41 870, 43 000, 43 230, 49 000, 59 346, 64 000, 71 306, 75 400, 79 758, 111 223, 118 543. Wartość parametru wynosi w tym przypadku $E = 2 898$ [km].

5. Podsumowanie

W kontekście dotychczasowych prac w pełni uzasadnione wydają się badania zmierzające do ustalenia wartości początkowego okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych (już stwierdzono, że jest on większy niż wskazywany przez Weibulla).

Badania te powinny doprowadzić do opracowania nowej procedury doboru łożysk tocznych w węzłach maszyn, w której pod uwagę będzie brany początkowy okres ich niezawodnej pracy. Jednak by propozycje zmian w procedurze doboru łożysk tocznych oprzeć na silnych przesłankach konieczna jest rzetelna analiza danych o trwałości łożysk eksploatowanych w warunkach rzeczywistych.

Zastosowanie procedury analizy wyników badań skróconych do wyników wyrwykowych, pochodzących z serwisów, daje możliwość estymacji okresu niezawodnej pracy łożysk tocznych.

Praca wpłynęła do Redakcji 26.03.2007 r.

Literatura

- [1] Katalog główny. SKF 1991.
- [2] Krzemiński-Freda H.: Łożyska toczne. PWN, Warszawa 1985.
- [3] Weibull W., A statistical distribution function of wide applicability, Journal of Applied Mechanics, 1951, no 18.
- [4] Bieda F., Trwałość łożysk tocznych uwarunkowana rodzajem i stanem smarów plastycznych, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 1980 nr 3.
- [5] Waligóra W.: Badanie wpływu doboru niektórych elementów składowych na jakość łożysk tocznych, Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych 1970.
- [6] Eschman P., Das Leistungsvermogen der Waltzlager, Berlin, Springer-Verlag 1964.
- [7] Waligóra W.. Badania jakości łożysk wałeczkowych. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1981.
- [8] Waligóra W., Siecla T., Wołyński A., Badanie własności warstwy wierzchniej elementów łożysk w celu optymalizacji wytrzymałości powierzchniowej. Sprawozdanie z realizacji badań w ramach problemu węzłowego (niepublikowane).
- [9] Waligóra W., Libera M., Pawełczyk K., Analiza wpływu rozrzutu wartości parametrów warstwy wierzchniej na rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów łożysk tocznych, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN nr 7T07B02715, Poznań 2000 (niepublikowane).
- [10] Kolar D., Libera M., Waligóra W., Ocena wpływu dodatku smarowościowego (EP) do oleju przekładniowego na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów maszyn, Tribologia, 2000 nr 3.
- [11] Waligóra W., Odporność na zmęczenie powierzchniowe stali łożyskowej poddanej obróbce laserowej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
- [12] Furmanek S., Szybisz Z.: Niezawodność łożysk tocznych. WEMA, Warszawa 1989.

The estimation of initial period of reliable work of the roll bearings on the basis of random exploitation investigation**S u m m a r y**

The aim of this paper is the presentation of the estimation method of the initial period of vehicles roller bearing reliable work on the basis service station information.

The roller bearings choice procedure which don't takes into account this period is now applied, but in this paper it was shown that initial period of roller bearing reliable work exist. This conclusion was drawn on the basis of laboratory investigation of bearings and these elements.

The laboratory investigation of bearing life (full or shorted) give any information about real behavior of bearings during exploitation. In the consequence a effect of their analysis are insufficient premise to change of the roller bearings choice procedure.

True information about vehicle bearing life give documentation of service station. This kind of data give information about life of bearings which were worked inside specified model car but don't give information about number of these cars.

In this paper a proposal of estimation method of initial period of reliable work of the roll bearings on the basis of random exploitation investigation put forward.

