

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH
Łódź, 12 – 14 maja 1999 r.

Andrzej Dziurski, Ludwik Kania, Eugeniusz Mazanek
Politechnika Częstochowska

**WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK NOŚNOŚCI STATYCZNEJ
ŁOŻYSK TOCZNYCH WIĘNCOWYCH
ZA POMOCĄ PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH**

SŁOWA KLUCZOWE:

maszyny robocze ciężkie, łożyska wieńcowe, charakterystyki nośności

STRESZCZENIE

Najczęściej spotykaną charakterystyką nośności statycznej łożysk wieńcowych jest wykres $M = f(Q)$, gdzie Q jest składową osiową obciążenia zewnętrznego łożysk, natomiast M – składową momentową (nazywaną momentem wyrotnym). Takie charakterystyki nie zawsze są wystarczające, ponieważ nośność w wielu przypadkach obciążenia zależna jest również od siły promieniowej H . W celu uzyskania tego rodzaju charakterystyk stosuje się nomogramy do wyznaczania nośności, które są zbudowane w oparciu o ogólny wykres nośności $M = f(Q, H)$. Korzystanie z podstawowej postaci takich nomogramów jest jednak uciążliwe i obarczone błędami przybliżenia. W referacie przedstawiono sposób automatycznego sporządzania charakterystyk łożyska z wykorzystaniem odpowiedniego systemu programów, umożliwiającego określanie charakterystyk dowolnego typu łożysk wieńcowych, w tym również z uwzględnieniem luzu osiowego, który ma decydujący wpływ na nośność i trwałość użytkową łożyska.

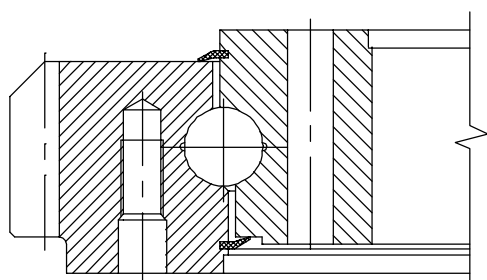
WPROWADZENIE

Łożyska toczne wieńcowe są najczęściej stosowane w mechanizmach obrotu maszyn roboczych ciężkich i przenoszą jednocześnie obciążenia osiowe, promieniowe i moment wyrotny. Ze względu na duże koszty wykonania i ewentualnej wymiany łożyska pożądanym jest ich staranny dobór i duża trwałość użytkowa. Dobór łożysk tocznych przeprowadza się najczęściej w oparciu o wykresy nośności statycznej zwane charakterystykami łożyska. Najczęściej spotykaną w katalogach firmowych charakterystyką nośności statycznej jest wykres $M = f(Q)$ [5,6], gdzie Q jest składową osiową obciążenia zewnętrznego łożyska, natomiast M – składową momentową, nazywaną momentem wyrotnym. Takie charakterystyki nie zawsze są wystarczające, ponieważ w wielu przypadkach łożysko przenosi duże siły promieniowe H i wówczas charakterystyki nośności, zbudowane dla takiego obciążenia łożyska mają inny przebieg. W celu uzyskania wykresów nośności $M = f(Q, H)$ można korzystać z nomogramów

[1]. W obecnej pracy będą zaprezentowane możliwości automatycznego sporządzania charakterystyki łożyska z wykorzystaniem systemu programów komputerowych, umożliwiającego określenie charakterystyki nośności dla różnych typów łożysk wieńcowych.

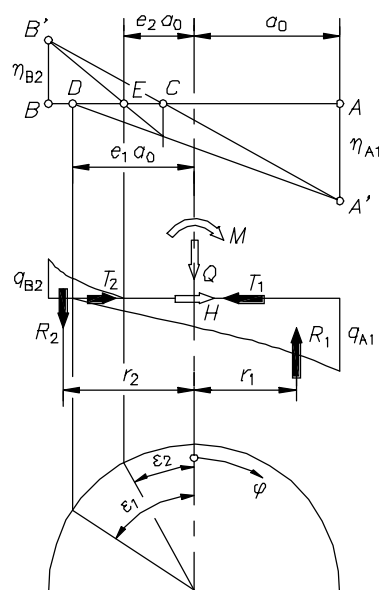
MODEL OBLICZENIOWY

Ze względu na ograniczoną objętość pracy rozważania ograniczono do łożysk wieńcowych kulkowych jednorzędowych o styku czteropunktowym (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój łożyska wieńcowego jednorzędowego kulkowego

Do budowy modelu obliczeniowego przyjęto klasyczny zestaw założeń upraszczających [1,3] przyjmując całkowitą sztywność giętno-skrętną pierścieni łożyskowych. Podstawowy przypadek obciążenia łożyska, nazwany modelem N1, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Podstawowy model obliczeniowy łożyska wieńcowego – N1

Przyjęto, że pierścienie łożyska przemieszczają się względem siebie, jako bryły sztywne, chwilowym środkiem obrotu jest punkt C. Trójkąt DAA' obrazuje wzajemne przemieszczenie się pary bieżni nośnych, trójkąt EBB' – wzajemne przemieszczanie się pary bieżni podtrzymujących, a prosta A'B' – przekoszenie pierścienia wewnętrznego względem pierścienia zewnętrznego. Obciążenie wewnętrzne łożyska, tzn. oddziaływanie pomiędzy bieżniami i częściami tocznymi potraktowano jako obciążenie ciągłe q z maksymalnymi wartościami węzłowymi q_{A1} w rzędzie nośnym i q_{B2} w rzędzie podtrzymującym oraz przypadkowymi reakcjami R_1 w kierunku osiowym i T_1 w kierunku promieniowym w rzędzie nośnym i odpowiednio R_2 i T_2 w rzędzie podtrzymującym. Inne przypadki obciążenia łożyska nazwane N2 i N3 są omówione w pracy [1]. Są to przypadki zachodzące wtedy, gdy obciążenie promieniowe H przekroczy określona wartość bądź ze zwrotem dodatnim, – model N2, bądź ze zwrotem ujemnym – model N3.

Nośność statyczną łożyska określono przyjmując względne dopuszczalne odkształcenia plastyczne w miejscu styku części tocznej i bieżni $\delta_{pldop}/d = 2 \cdot 10^{-4}$. Następnie korzystając ze wzorów empirycznych Eschmanna [2] obliczono siły P_{dop} przypadające na najbardziej obciążoną kulkę na bieżni. Układ sił w łożysku umożliwia ustalenie warunków równowagi statycznej i następnie tzw. równań statyki łożyska oraz równań przemieszczeń pierścieni dla każdego z modeli tzn. N1, N2 i N3, przy czym wielkości R_1, R_2, T_1, T_2 (rys. 2) są wypadkowymi obciążeniami ciągłego i wyznacza się je przez całkowanie po odpowiadającym im zakresie kątów φ_1 i φ_2 . Równania te zostały wyprowadzone we wcześniejszych pracach autorów [3,4], gdzie uwzględniano również luz osiowy w łożysku. Wprowadzając parametry obciążenia zewnętrznego łożyska określone zależnościami:

$$k = \frac{M}{Qa_o} \quad \text{oraz} \quad k_H = \frac{H}{Q_{\max}} \quad (1)$$

gdzie: a_o - promień toczenia na bieżniach, Q_{\max} - maksymalna siła, jaką może przenieść łożysko obciążone tylko siłą osiową,

dla modelu N1 otrzymano dwa równania statyki łożyska:

$$kJ_1 - J_3 - v^{1,5} \left(\frac{1+e_1}{1-e_2} \right)^{1,5} (kJ_2 - J_4) = 0 \quad (2)$$

$$\pi \operatorname{tg} \alpha (1+e_1)^{1,5} k_H - J_3 = v^{1,5} \left(\frac{1+e_1}{1-e_2} \right)^{1,5} J_4 = 0 \quad (3)$$

Wielkości e_1, e_2 oraz $v = \eta_{B2}/\eta_{A1}$ są parametrami rozkładu obciążenia wewnętrznego łożyska, a $J_1 \div J_4$ są całkami obciążenia jednostkowego liczonymi po obwodzie łożyska wg wzorów przedstawionych w [1]. Równania te w połączeniu z równaniem przemieszczeń:

$$v^2 \frac{1+e_2}{1-e_2} - 2v + \frac{1-e_1}{1+e_1} = 0 \quad (4)$$

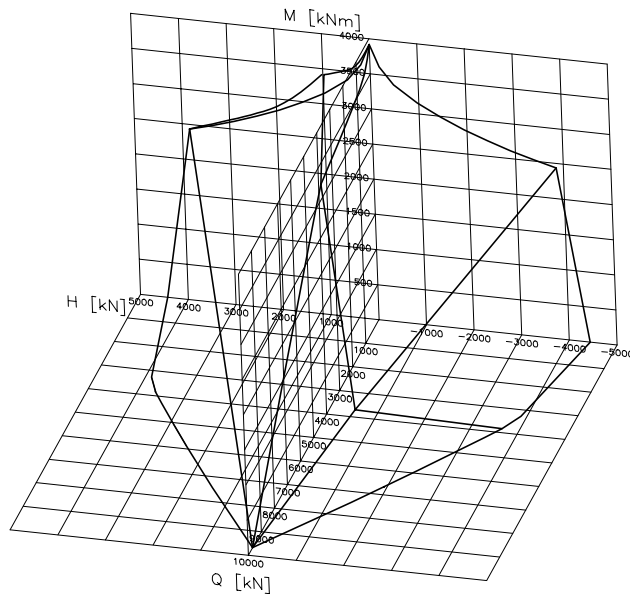
stanowią układ, który dla założonych wartości parametrów k i k_H pozwala wyznaczyć wartości współczynników obciążenia wewnętrznego. Rozwiązanie układu równań (2), (3), (4) oraz analogicznych równań ustalonych dla przypadków N2 i N3 pozwala na określenie pełnej charakterystyki łożyska w układzie współrzędnych (M, Q, H) . Z uwagi na złożony charakter równań, szczególnie występowanie w nich całek eliptycznych, uzyskanie rozwiązania jest możliwe jedynie na drodze numerycznej.

Omówiona metodyka obliczeń pozwala zbudować wykres nośności we współrzędnych (M, Q, H) . Po przeprowadzeniu obliczeń numerycznych zbudowano taki wykres (rys. 3) dla łożyska kulkowego jednorzędowego o parametrach: średnica toczenia $d_t = 1390$ mm, liczba kulek $z = 86$, średnica kulki $d = 44,45$ mm, promień bieżni $r = 23,10$ mm, kąt działania $\alpha = 45^\circ$, twardość bieżni 52 HRC.

CHARAKTERYSTYKI ŁOŻYSK

Przedstawiony na rys. 3 wykres nie jest oczywiście wygodny w praktyce. Do doboru łożyska z katalogu, czy do sprawdzenia, gdzie znajduje się punkt pracy łożyska określony poprzez składowe obciążenia zewnętrznego najwygodniej korzystać jest z charakterystyki łożyska $M = f(Q)$. Do sporządzania takich charakterystyk w przypadku obciążenia łożyska siłą promieniowa H w pracy [1] zaproponowano metodę opartą na wykorzystaniu odpowiednio

skonstruowanych nomogramów łożysk wieńcowych. Obciążenie promieniowe w tej metodzie jest potraktowane jako parametr eksploatacyjny łożyska. Takie rozwiązanie obok podstawowej zalety, jaką jest możliwość określenia charakterystyki dla dowolnej wartości obciążenia promieniowego, posiada szereg wad.



Rys. 3. Pełna charakterystyka łożyska wieńcowego $M = f(Q, H)$

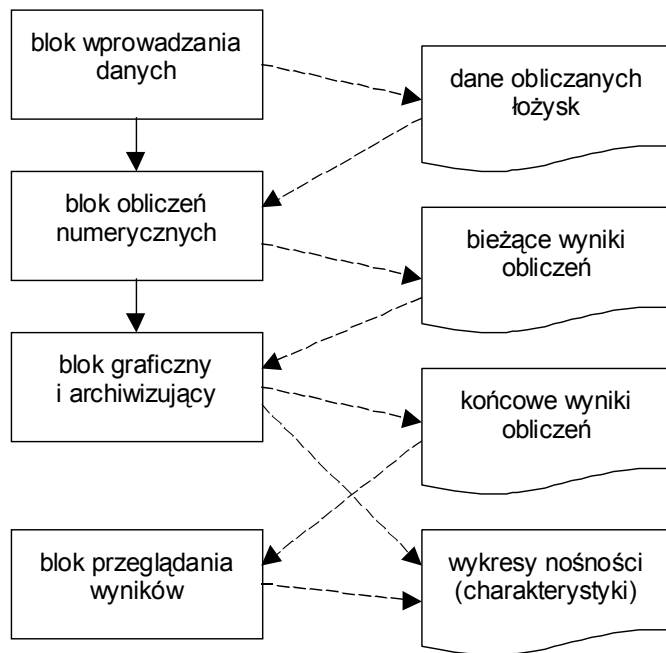
Charakterystyki trzeba sporządzać metoda wykreślną, co prowadzi do pewnych koniecznych uproszczeń przebiegu krzywych nośności łożyska (zastępuje się je odcinkami prostych) oraz do nieuniknionych błędów wynikających z samej techniki sporządzania wykresów. Ponadto niejednokrotnie konieczne jest określanie charakterystyk dla wielu wariantów rozwiązań konstrukcyjnych łożyska, w celu wybrania najkorzystniejszego rozwiązania. Od ręczne sporządzanie wielu charakterystyk jest więc czasochłonne. Okazuje się również, że w przypadku obciążenia łożyska siłą promieniową o odpowiednio dużej wartości traci sens sporządzanie charakterystyki w postaci wykresu [3]. Znacznie korzystniejsze jest wtedy posługiwanie się charakterystykami w postaci wykresów $M = f(H)$, jednak tego typu wykresów nie można uzyskać bezpośrednio z nomogramu łożyska wieńcowego [1].

Aby wyeliminować te i inne wady dotychczas stosowanej metody opracowano system programów komputerowych do automatycznego sporządzania charakterystyk łożyska. Podstawowym wymaganiem, jakie postawiono przed tym systemem jest możliwość uzyskiwania wykresów dla wszystkich rodzajów łożysk wieńcowych tzw. grupy II, czyli tych łożysk w których wszystkie składowe obciążenia zewnętrznego są przenoszone przez te same rzędy części tocznych. Dodatkowo uwzględniono możliwość analizy luzów łożyskowych i określania współczynników pewności łożyska dla określonego punktu pracy. Poprzez współczynnik pewności rozumiany jest iloraz obciążenia granicznego łożyska (wynikającego z krzywej nośności dla zadanej wartości parametru k) i rzeczywistego obciążenia zewnętrznego łożyska. Przy sporządzaniu charakterystyk łożyska przyjęto ten sam sposób jaki zaproponowano w pracy [1], tzn. za charakterystykę łożyska $M = f(Q)$ dla zadanej wartości parametru H uważa się wspólną część pól pracy łożyska dla dodatniej i ujemnej wartości tego parametru.

Na system obliczania charakterystyk składają się cztery bloki programowe (trzy główne i jeden pomocniczy), które przetwarzają dane wykorzystując odpowiedni system plików z parametrami łożyska i wynikami obliczeń. Ogólny schemat wzajemnych powiązań między blokami systemu programów pokazano na rys. 4.

Blok wprowadzania danych pozwala na wprowadzenie do programu wartości wszystkich koniecznych parametrów:

- rodzaju łożyska (jednorzędowe łożyska wałeczkowe krzyżowe, łożyska kulkowe jedno-rzędowe i dwurzędowe, łożyska kulkowe podwójne),
- podstawowych wymiarów łożyska (średnicy tocznej, liczby i średnicy części tocznych, promienia zaokrąglenia bieżni, kąta działania, średnicy rozmieszczenia śrub mocujących i ich liczby, średnicy gwintu, sposobu rozmieszczenia tych śrub),
- parametrów eksploatacyjnych (liczby i wartości luzów osiowych, liczby i wartości sił promieniowych, rzeczywistego punktu pracy, twardości bieżni),
- parametrów numerycznych warunkujących poprawność całkowania numerycznego i odpowiednią dokładność rozwiązywania równań.

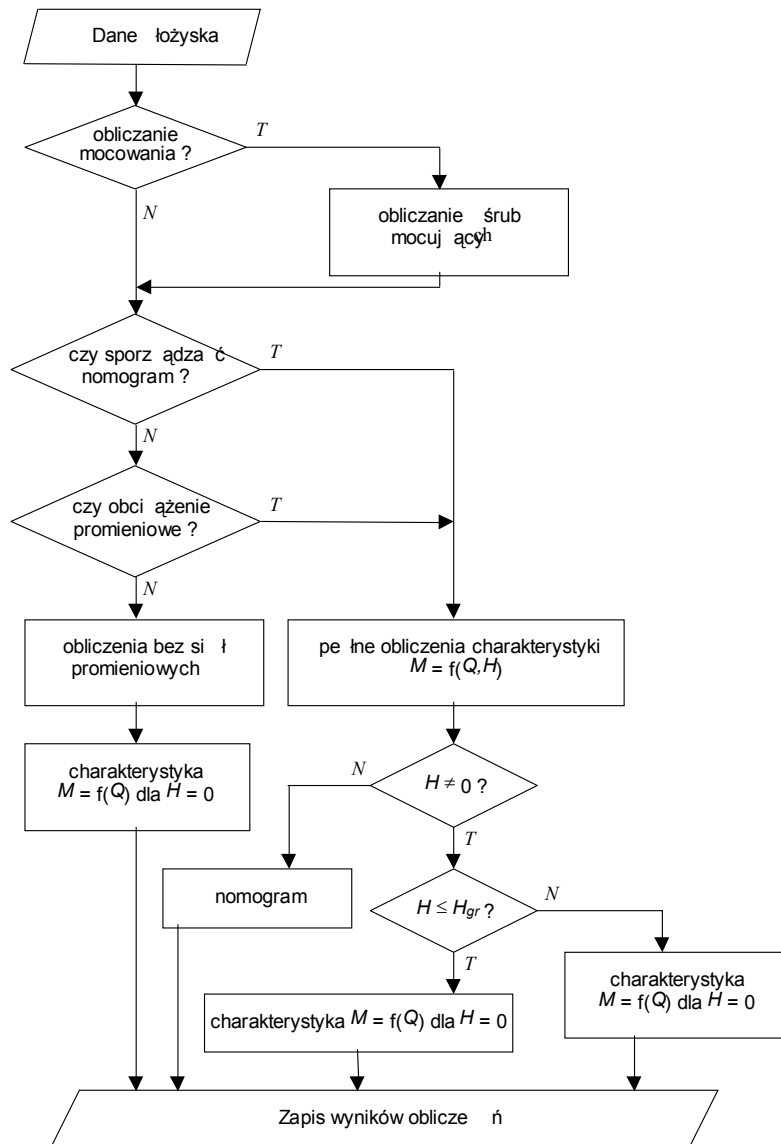


Rys. 4. Ogólny schemat systemu programów do obliczania nośności łożysk wieńcowych

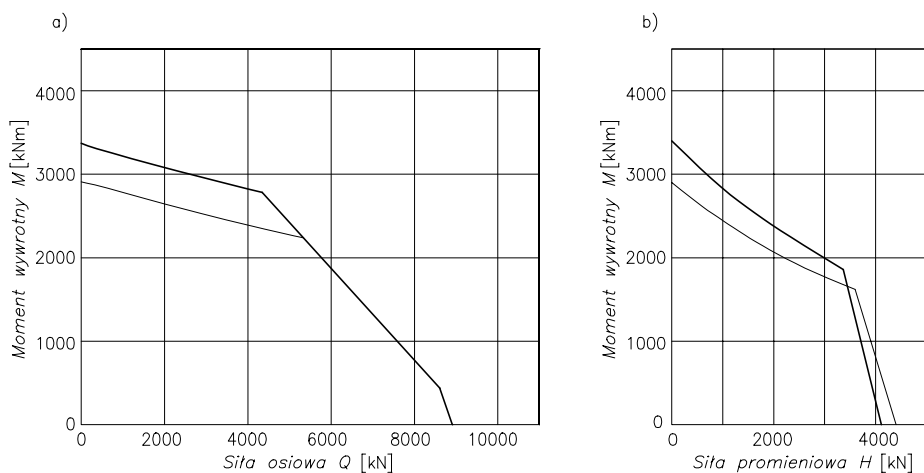
Blok obliczeń numerycznych stanowi jądro programu. Z uwagi na trudności numeryczne na jakie napotkano przy rozwiązywaniu łożysk opracowano specjalizowane procedury iteracyjne obliczania nośności dla kolejnych wartości parametru k , oraz specjalizowane, dostosowane do specyfiki równań równowagi łożysk, procedury rozwiązujące układy równań dla poszczególnych przypadków modelu łożyska (oparte o metodę Newtona z uwzględnieniem szeregu zabezpieczeń zapobiegającym rozbieganiu się ciągów iteracyjnych). Całki eliptyczne obliczono za pomocą algorytmu opartego o metodę Gaussa.

Wartości wielu parametrów numerycznych zostały ustalone na podstawie eksperymentu numerycznego. Jak napisano powyżej, charakterystykę łożyska w postaci wykresu $M = f(Q)$ sporządza się tylko do pewnych wartości siły promieniowej H_{gr} , jej definicję podano w [3]. Powyżej tej wartości zachodzi przypadek obciążenia łożyska tzw. dużą siłą promieniową, charakter pracy łożyska wieńcowego jest bardziej zbliżony do pracy łożyska promieniowego (oczywiście nadal uwzględnia się wszystkie trzy składowe obciążenia zewnętrzne). Przy obliczaniu charakterystyk w postaci $M = f(Q)$ dla dużych sił promieniowych napotkano ponadto na pewne trudności numeryczne. Zatem charakterystyki te zastępuje się charakterystykami typu $M = f(H)$. Na rys. 5 przedstawiono uproszczony schemat działań bloku numerycznego.

Blok graficzny i archiwizujący pozwala na uzyskanie wykresów nośności łożyska według założonych parametrów. Blok ten pozwala na wydrukowanie charakterystyk łożysk wieńcowych dla zadanych wartości parametrów. Na rys. 6 pokazano przykładowe charakterystyki łożyska wieńcowego uzyskane za pomocą omawianego systemu programów. Wyniki obliczeń są następnie archiwizowane dla wykorzystania przez blok przeglądania wyników.



Rys. 5. Uproszczony schemat bloku numerycznego



Rys. 6. Charakterystyki przykładowego łożyska wieńcowego: a) w postaci wykresu $M = f(Q)$ dla $H = 500$ kN, b) w postaci wykresu $M = f(H)$ dla $Q = 2000$ kN – linia gruba oznacza łożysko bezluzowe, linia cienka łożysko z luzem osiowym 0,3 mm

Blokiem pomocniczym jest blok przeglądania wyników, za pomocą którego można wydrukować wcześniej obliczone i zapisane charakterystyki łożysk.

System zbudowano w dwóch wersjach programowych: dla systemu operacyjnego DOS, (można używać go również spod systemu Windows 95) oraz w wersji dla Windows 95/98. W przygotowaniu jest wersja dla systemu operacyjnego Windows NT.

UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiony powyżej w dużym skrócie schemat działania systemu programów do obliczania nośności statycznej łożysk wieńcowych pozwala na łatwe uzyskanie dowolnej charakterystyki każdego z powszechnie stosowanych typów łożysk. System ułatwia analizę konstrukcji łożysk pozwalając sporządzać charakterystyki dla różnych wartości luzów osiowych i dowolnych wartości sił promieniowych obciążających łożysko. Jest to szczególnie ważne dla użytkownika. System bloków programowych pozwala na modyfikację każdego z bloków niezależnie od pozostałych, ułatwia to wprowadzanie zmian do systemu, który jest systemem otwartym, podlegającym zmianom wynikającym z jednej strony z rozwoju metod obliczeniowych łożysk wieńcowych a z drugiej strony z modyfikacji metod numerycznych i usuwaniu usterek napotykanym przez użytkowników programu w trakcie obliczeń dla nietypowych parametrów. System obliczeń numerycznych pozwala na osiągnięcie założonej dokładności rozwiązywania równań. Przewiduje się w najbliższej przyszłości na powiązanie tego systemu z blokiem programów do obliczania trwałości łożysk wieńcowych, a w dalszej kolejności z blokiem do obliczania nośności ruchowej. Obecnie system jest rozbudowywany o procedury wspomagające automatyczne sporządzanie dokumentacji łożysk wieńcowych w powiązaniu z programem AutoCAD®.

LITERATURA

1. Dziurski A., Kania L. Mazanek E.: Charakterystyki łożysk wieńcowych. Przegląd Mechaniczny 1990, 49, (20) s. 51-60.
2. Eschmann P., Hasberger L., Weigand K.: Die Wälzlagerpraxis. Oldenburg Verlag, München 1978.
3. Dziurski A., Kania L. Mazanek E.: Charakterystyki łożysk wieńcowych obciążonych dużymi siłami promieniowymi. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1996, 31, (4) s. 509-528.
4. Mazanek E.: An Expanded Method for Calculating Load Carrying Capacity of Large-Dimensional Two-Row Ball Bearings. Archiwum Budowy Maszyn 1992, 39 (3).
5. Rothe Erde. Großwälzlager. Krupp, Dortmund 1993.
6. Łożyska toczne wielkogabarytowe. Katalog – informator. ZAFAMA, Zawiercie 1997.

DELIMITATION OF STATIC LOAD CARRYING CAPACITY DIAGRAMS FOR SLEWING RING RIMMED BEARINGS WITH USE OF COMPUTATIONAL PROGRAMS.

ABSTRACT

The most frequently applied diagram of load carrying capacity for slewing ring rimmed bearings is a diagram of $M = f(Q)$, where Q is an axial component of external loading of the bearing, and M is the so called overturning moment. Sometimes this diagram is unsatisfac-

tory because in many cases the capacity depends on a radial component H of external loading of a bearing. To obtain diagrams of that kind a system built on a base of a general diagram of load capacity $M = f(Q, H)$ is used. Applying those alignments chart systems is toilsome and the results may suffer approximation errors. The paper presents a manner of automatic preparation of characteristics of a bearing with the use of a proper system of programs making it possible to characterise all kinds of bearings, among others a bearing clearance, which has a great effect on the capacity and practical exploitation durability of a bearing.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr 7 T07C 001 12 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1997-1999.

Recenzent: Jan Burcan