

Zbigniew Niestrawski  
Wyższa Szkoła Inżynierska  
w Opolu  
Zespół Miernictwa Elektrycznego

## PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ ŁOŻYSK MAGNETYCZNYCH W PRZYRZĄDACH POMIAROWYCH

**Streszczenie.** Zagadnienie zwiększenia trwałości wielu urządzeń i przyrządów sprowadza się często do zwiększenia trwałości łożysk. W referacie przedstawiono kilka konstrukcji łożysk magnetycznych stosowanych w licznikach energii elektrycznej oraz omówiono postęp w zakresie zwiększenia trwałości tych przyrządów.

### 1. Wstęp

O trwałości urządzeń zawierających elementy ruchome, a zwłaszcza wirujące, decyduje najczęściej jakość łożysk. Problem łożyskowania wirnika w ogóle czy też łożyskowania wirników poszczególnych urządzeń był wielokrotnie przedmiotem szczegółowych studiów oraz bardzo pracochłonnych badań naukowych. W rezultacie powstało wiele konstrukcji łożysk zawierających różne zestawy materiałów, z których wykonuje się części współpracujące oraz nastąpił duży postęp w zakresie jakości smarów. Istotne zwiększenie mechanicznej odporności łożyskowania uzyskuje się bowiem przez zapewnienie możliwie najmniejszego tarcia i możliwie najmniejszych naprężeń. Zagadnienie to rozwiązano częściowo w łożyskach pneumatycznych stosowanych szeroko w żyroskopach i akcelerometrach lotniczych. Jednakże niezwykle skomplikowana konstrukcja i jeszcze bardziej złożona technologia sprawiają, że koszty wykonania takich łożysk są bardzo wysokie. Nie sprzyja to oczywiście ich szerszemu rozpowszechnieniu.

Jeszcze w ubiegłym wieku usiłowano wykorzystać siły występujące w polu magnetycznych do swobodnego zawieszania ciał, ponieważ np. magnes trwały może podeprzeć swój własny ciężar i unosić się nad innym magnesem trwałym. Zgodnie z definicją A.H. Boerdijk'a [1] ciało można określić jako zawieszony, jeśli jest ono w stanie trwałej równowagi względem ziemi bez materialnego kontaktu z otoczeniem. Niestety brak stabilności uniemożliwia praktyczną realizację tego rodzaju zawieszania. Możliwa jest ona jednak w przypadku, gdy jeden ze stopni swobody ruchu ciała zostanie zlikwidowany przez mechaniczne ograniczenie wprowadzające nieswobodny kontakt cia-

ła z jego otoczeniem. Ograniczenie to uniemożliwia ruch w kierunku poziomym, natomiast przesunięcia pionowe i ruch obrotowy pozostają swobodne. Umożliwia to konstrukcję łożyska magnetycznego, w którym tarcie zostanie zmniejszone, lecz jednak nie wyeliminowane całkowicie. Całkowite wyeliminowanie tarcia w przypadku łożyskowania magnetycznego wirników o pionowej osi byłoby możliwe tylko przy braku jakichkolwiek sił działających w kierunku poziomym.

Wykorzystanie zawieszenia magnetycznego może być bardzo różnorodne. Odnotować tu należy opublikowane wyniki prób zastosowania łożyskowania magnetycznego w żyrokompasach, w silnikach o mocy ułamkowej, w bardzo czułych anemometrach, w wirówkach i ultrawirówkach. Beams [2] uzyskał prędkość obrotową stalowej kulki o średnicy 0,1 mm rzędu  $8 \cdot 10^5$  obr./min., natomiast na szerszą skalę zastosowano łożyskowanie magnetyczne wrzecion w maszynach do produkcji włókien syntetycznych, gdzie wymagana jest prędkość obrotowa 40 000 obr./min. E.C. Okress i jego współpracownicy [3] zastosowali zawieszenie magnetyczne w próżni do podgrzewania i topienia metali bez tygla, co sugeruje nową technikę stopową. W przytoczonych powyżej przykładach stosowano oczywiście zawieszenie ciał nie tylko w polu magnesu trwałego, lecz także w polu elektromagnesu. W takim przypadku zawieszona ciało może być również elementem wagi analitycznej, ponieważ jego ciężar można bardzo dokładnie określić na podstawie pomiaru prądu płynącego przez cewkę. Beams [2] w skonstruowanej przez siebie wadze uzyskał dokładność rzędu  $10^{-5}$  mg. Brak mechanicznego tarcia przy ruchu postępowym sugeruje wykorzystanie zawieszenia magnetycznego w trakcji, gdzie przyszłościowe pasażerskie pojazdy jednoszynowe mają uzyskiwać prędkość nawet 300 mil na godzinę.

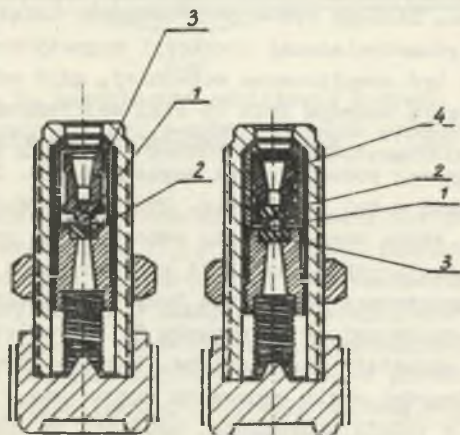
Większość wymienionych tu przykładów łączy wspólna cecha, a mianowicie ich realizacja nie wyszła poza próby laboratoryjne lub produkcję jednostkową. Łożyska magnetyczne znalazły najpowszechniejsze zastosowanie w budowie indukcyjnych liczników energii elektrycznej. Od lat stosuje się je w licznikach produkowanych seryjnie.

## 2. Łożyskowanie wirników w licznikach energii elektrycznej

Wprowadzony do produkcji seryjnej w 1894 roku indukcyjny licznik energii elektrycznej Shallenbergera podlegał nieustannym zmianom konstrukcyjnym i technologicznym, jednak zasada działania okazała się najbardziej odpowiednią i pozostała niezmienną. Można z całą pewnością stwierdzić, że liczniki indukcyjne są najliczniejszymi elektrycznymi przyrządami pomiarowymi w każdym kraju. Dla przykładu można na podstawie danych literaturowych [4] podać, że w NRF pracuje u abonentów około 30 milionów liczników jednofazowych, a w ZSRR około 50 milionów. Okres legalizacyjny w różnych krajach wynosi od 8 do 15 lat i zależy od poziomu technicznego producentów liczników. Szacuje się, że w Związku Radzieckim koszty demontażu, re-

montu, sprawdzenia i ponownego instalowania tylko liczników jednofazowych kształtują się w granicach kilkunastu milionów rubli. Do tego dochodzą koszty sprawdzania liczników trójfazowych, których co prawda jest mniej, ale za to ich okres legalizacyjny jest krótszy i wynosi najczęściej 3 do 5 lat. Mimo że liczniki w porównaniu z innymi elektrycznymi przyrządami pomiarowymi odznaczają się i tak dużą trwałością to jednak z uwagi na fakt, że liczba instalowanych w każdym kraju liczników rośnie nieustannie, zagadnienie zwiększenia trwałości, czyli zwiększenia okresu pracy bez konieczności konserwacji, ma bardzo istotne znaczenie techniczne i ekonomiczne.

Badania liczników po kilkunastu latach ich bezusterkowej pracy wykazywały pogarszanie się ich własności metrologicznych spowodowane w pierwszym rzędzie zużyciem elementów łożysk. Podział całkowitego momentu tarcia [5] powodowanego przez poszczególne elementy kształtuje się następująco: 10% liczydło, 20% łożysko górne i 70% łożysko dolne. Dlatego też wysiłki konstruktorów skupiają się przede wszystkim na poprawie jakości łożyska dolnego. Od około 1920 roku firma Westinghouse i od 1940 English Electric, a nieco później firmy niemieckie AEG i Siemens [5], [6] stosowały w swych licznikach łożyska dolne pojedyncze pokazane na rysunku 1a, względnie łożyska dolne podwójne pokazane na rysunku 1b. W łożyskach po-



Rys. 1 a- łożysko dolne jednopanewkowe

1 - stalowa kulka, 2 -panewka z syntetycznego szafiru, 3 - uchwyt wału wirnika

b. łożysko dolne dwupanewkowe

1 - stalowa kulka, 2-3 - panewka z syntetycznego szafiru, 4 - uchwyt wału wirnika

jedynczych stalowa kulka łożyskowa współpracuje z panewką z syntetycznego szafiru, a w podwójnych jest ona umieszczona między dwoma takimi panewkami. Długoletnie doświadczenia z tego rodzaju łożyskami pozwoliły na doprowadzenie ich jakości do doskonałości. Trwałość łożysk pojedynczych sto-

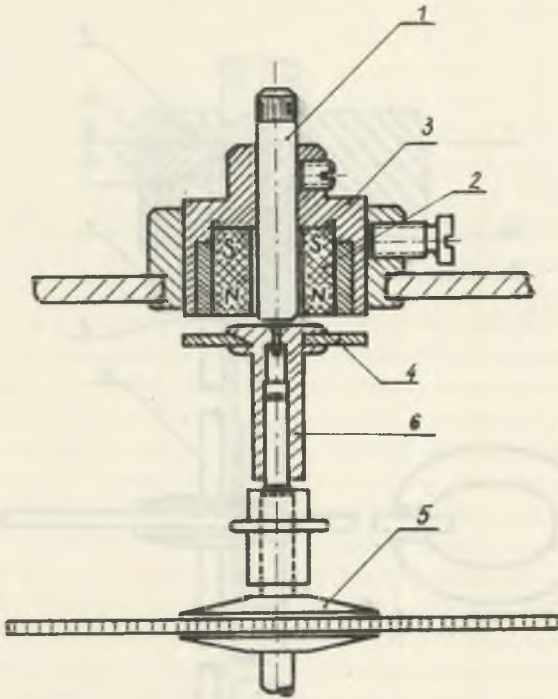


sowanych w licznikach jednofazowych posiadających wirnik o masie około 25 g określa się obecnie na 16 do 20 lat, a w licznikach trójfazowych, gdzie wirnik jest cięższy (około 65 g), na 6 do 10 lat [5]. Próby wykazały, że w łożysku podwójnym, przy tym samym ciężarze wirnika, tarcie jest o około 40% mniejsze, a więc trwałość odpowiednio większa. Niedawno łożyska o dwóch panewkach z importowanego szafiru syntetycznego wprowadzono do krajowej produkcji seryjnej liczników trójfazowych, a obecnie również i jednofazowych.

### 3. Przegląd konstrukcji łożysk magnetycznych liczników

Pomimo zastosowania najlepszych materiałów, starannego wypolerowania powierzchni i bezbłędnego montażu uprzednio sprawdzonych panewek i kulek łożyskowych, moment tarcia w łożyskach zwiększa się powoli lecz nieustannie wraz ze wzrostem liczby obrotów wykonanych przez wirnik. Duże naprężenia w kulce i panewkach rzędu  $8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$  ( $80 \text{ kg/mm}^2$ ) w licznikach jednofazowych i  $13 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$  ( $130 \text{ kg/mm}^2$ ) w licznikach trójfazowych oraz początkowy moment tarcia rzędu 0,0025 Gcm w licznikach jednofazowych powodują systematyczne zużywanie się elementów łożysk. Zużycie zmniejszy się, jeśli nawet wartość jednej z dwóch wielkości: naprężenie lub tarcie, zostanie zmniejszona. Dlatego też w celu dalszego zwiększenia trwałości powrócono do dziewiętnastowiecznej koncepcji magnetycznego łożyska wirnika. Idea ta nie mogła być zrealizowana wcześniej, gdyż wówczas najlepszym materiałem magnetycznym twardym była 6% stal wolframowa o zbyt małej energii jednostkowej  $(BH)_{\text{max}}$ . Postęp w dziedzinie materiałów magnetycznych twardych zapoczątkował rozwój łożysk magnetycznych. Istnieje bardzo dużo patentów i opracowań w tej dziedzinie. Poniżej omówiono jedynie kilka takich konstrukcji, które doczekały się wdrożenia do produkcji seryjnej.

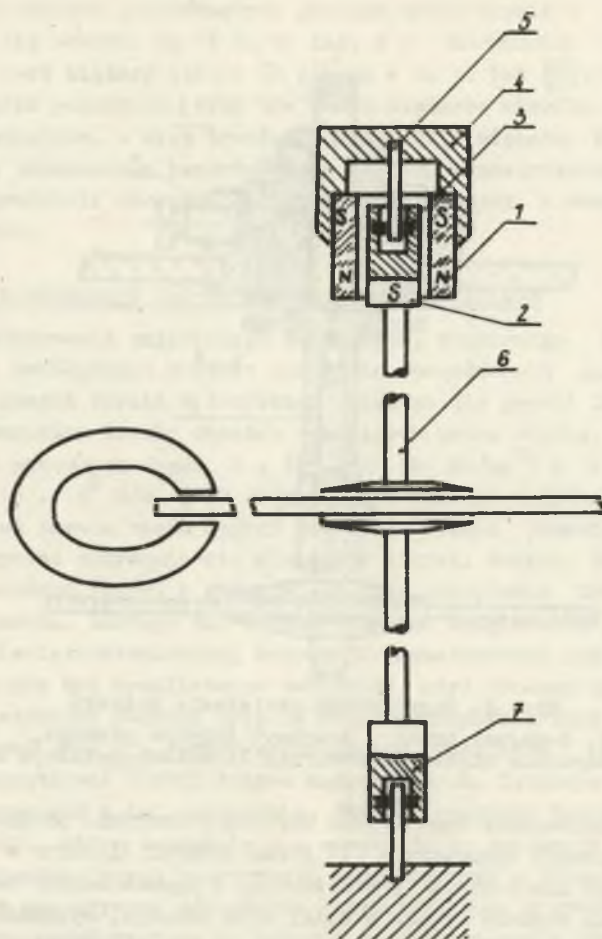
Jedną z najważniejszych konstrukcji zastosowanych w licznikach prądu zmiennego jest magnetyczne odciążenie łożyska dolnego w precyzyjnych licznikach Siemens przedstawione na rysunku 2. W rozwiązaniu tym łożysko dolne dwupanewkowe pozostaje niezmienione. łożysko górne typu szyjowego, w którym iglica z twardej stali umocowana nieruchomo w ramie nośnej licznika, współpracuje z tuleją prowadzącą, osadzoną na górnym końcu wału wirnika, również w zasadzie nie ulega zmianie. Zmieniono jedynie uchwyt mocujący nieruchomą część łożyska. Uchwyt ten utrzymuje dodatkowo pierścieniowy magnes trwały umieszczony koncentrycznie względem osi wirnika, namagnesowany w kierunku osiowym. Uchwyt wykonano ze stali magnetycznie miękkiej tak, że zabezpiecza on magnes przed odmagnesowującym wpływem obcych pól magnetycznych. Na górnym końcu wału wirnika osadzono pierścień ze stali magnetycznie miękkiej stanowiący zworę magnesu. Wskutek sił przyciągających zworę wraz z wirnikiem zmniejszyły się naprężenia w łożysku dolnym. W ten sposób rzeczywisty ciężar wirnika 50 g zredukowano do 10 g. Oczywiście zmniejszenie naprężeń zwiększa trwałość łożyska dolnego.



Rys. 2. Magnetyczne odciążenie łożyska

1-uchwyt iglicy, 2-magnes trwały, 3-uchwyt łożyska górnego, 4-pierścień ze stali magnetycznie miękkiej, 5-wirnik licznika, 6-tuleja mocująca

Całkowite zawieszenie magnetyczne wirnika w seryjnie produkowanych licznikach jednofazowych wprowadziła [7] firma General Electric w 1946 roku. Konstrukcję tego zawieszenia przedstawiono w uproszczeniu na rysunku 3. Dwa cylindryczne magnesy trwałe o dużej sile koercji, wykonane z dobrze obrabialnego materiału cynicy, umieszczone są koncentrycznie jeden wewnątrz drugiego. Są one namagnesowane osiowo, lecz o przeciwnej biegunowości. Zewnętrzny magnes przymocowany jest trwale do ramy wsporczej licznika a wewnętrzny osadzony jest na górnym końcu wału wirnika. Siły wytworzone w polu obu magnesów podtrzymują wirnik i dlatego dolne łożysko konwencjonalne stało się zbędne. W celu utrzymania wirnika w położeniu pionowym, na obu końcach wału wirnika osadzono grafitowe tuleje prowadzące, przez które przechodzą stalowe trzpienie umocowane w ramie licznika. Tego rodzaju łożyska sztywne mogą pracować bez smaru. Istnienie tarcia w tych łożyskach oraz ich mechaniczne zużywanie się, spowodowane jest przez siły boczne wytworzone w tarczy wirnika wskutek działania organu napędowego licznika i magnesu hamującego. Drugą przyczyną powstawania sił promieniowych może być pewna ekscentryczność magnesów łożyska magnetycznego.



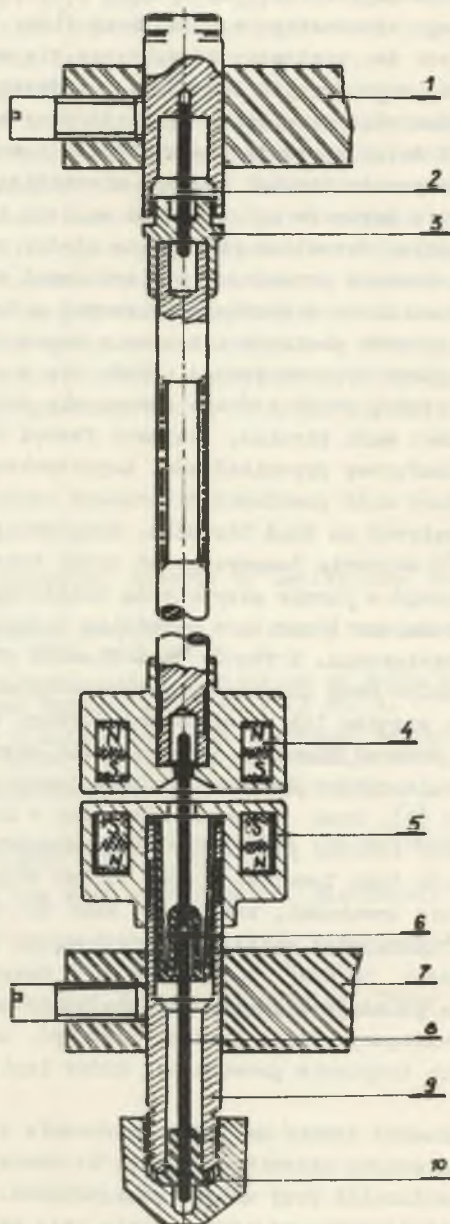
Rys. 3. Magnetyczne łożyskowanie wirnika w licznikach firmy General Electric

1-magnes trwały zewnętrzny, 2-wewnętrzny magnes trwały, 3-grafitowa tuleja prowadząca, 4-uchwyt łożyska górnego, 5-stalowy trzpień, 6-wał wirnika, 7-dolne łożysko szyjowe

Wprowadzenie łożysk magnetycznych do seryjnej produkcji liczników, poprzedzone zostało badaniami trwałości, które rozpoczęto w 1941 roku. Od tego czasu 194 liczniki jednofazowe z magnetycznie łożyskowanym wirnikiem pracowały bez przerwy przez kilka lat przy zwiększonym obciążeniu, zmienianym w cyklach dziennych i wykonały po 80 milionów obrotów. Odpowiada to pracy przez 65 lat przy obciążeniu znamionowym. Badania te wykazały doskonałą stabilność łożyskowania magnetycznego.

Pozostali producenci liczników przyjęli amerykańskie osiągnięcia spokojnie, stosując nadal łożyska stalowo-szafirowe. Dopiero w 1960 r., gdy





Rys. 4. Łożyskowanie wirnika w licznikach firmy English Electric 117-rama nośna licznika, 2-stalowy trzpień, 3-tuleja z molyenu, 4-magnes trwały, 5-molylenowa osłona magnesu, 6-10-tuleje mocujące trzpień, 8-stalowy trzpień, 9-mosiężny uchwyt łożyska

upłynął termin amerykańskich zastrzeżeń patentowych, inne wytwórnice zaczęły wprowadzać łożyska magnetyczne. Na rysunku 4 przedstawiono konstrukcję łożyska magnetycznego stosowanego w licznikach firmy English Electric [6]. Dolne łożysko zawiera dwa wzajemnie odpychające się magnesy pierścieniowe wykonane z anizotropowego ferrytu barowego, z których jeden przymocowany jest do dolnego końca wału wirnika, a drugi do ramy nośnej licznika. Obydwa magnesy: górny i dolny znajdują się w osłonie z molyblenu - materiału o bardzo małym współczynniku tarcia, będącym mieszaniną nylonu i dwusiarczku molibdenu. Zalanie magnesów molyblenem ma na celu ich ochronę przed uszkodzeniem mechanicznym. Szczelina powietrzna między osłoniętymi magnesami ma długość 0,5 mm. Sworzeń prowadzący z nierdzewnej stali o średnicy 0,8 mm przechodzący przez otwór w środku molyblenowej osłony magnesu ruchomego ogranicza ruch w kierunku poziomym i zapewnia koncentryczność pól magnetycznych. Łożysko górne typu szyjowego składa się z polerowanego trzpienia z nierdzewnej stali, wokół którego obraca się tuleja z molyblenu osadzona na górnym końcu wału wirnika. Ponieważ ferryt barowy posiada ujemny współczynnik temperaturowy przenikalności magnetycznej około 0,19%/deg, to zmiana temperatury może powodować nieznaczne unoszenie lub opadanie wirnika, co mogłoby wpływać na błąd licznika. Kompensację tych zmian w zakresie od -20 do +50°C zapewnia temperaturowo czuły bocznik magnetyczny ze stopu żelazo-niklowego w formie pierścienia nasadzonego na dolny magnes.

Inne firmy produkujące liczniki z wirnikiem łożyskowanym magnetycznie stosują podobne rozwiązania. Z reguły taki licznik posiada dwa łożyska szyjowe, górne i dolne oraz łożysko magnetyczne umieszczone na wysokości górnego końca wału wirnika lub na wysokości dolnego końca. Pierwszą odmianę stosuje oprócz General Electric jeszcze firma Ferranti, natomiast lokalizację dolną stosuje oprócz English Electric jeszcze Westinghouse oraz producent japoński [8]. Poza drobnymi różnicami w konstrukcji poszczególnych detali bardziej istotny jest dobór stosowanych materiałów. Gwarantowana przez większość firm trwałość wynosi 25 lub więcej lat.

Z punktu widzenia trwałości, tarcie nie musi być mniejsze niż w łożyskach konwencjonalnych, gdyż naciski jednostkowe na trzpień prowadzący nie przekraczają wartości  $10^6 \text{ N/m}^2$  ( $0,1 \text{ kg/mm}^2$ ) i nawet kilkadziesiąt milionów obrotów nie powoduje żadnego, godnego uwagi zużycia ani trzpienia ani też tulei prowadzącej. Warto jeszcze zauważyć, że producenci zazwyczaj stosują długie trzpienie prowadzące, które lepiej amortyzują wibracje wirnika.

Zmniejszenie momentu tarcia ma jednak znaczenie ze względu na poprawę własności metrologicznych licznika. Pozwala to zmniejszyć moc rozruchową licznika i błąd, zwłaszcza przy małych obciążeniach. Japońskie liczniki posiadające wirniki łożyskowane magnetycznie mają klasę 1.



#### 4. Wnioski

We wszystkich [5], [6], [7], [8], [9] publikacjach, przedmiotem rozważań są tylko techniczne aspekty zastosowania łożysk magnetycznych w licznikach. Niekiedy można jednak znaleźć wzmiankę, że liczniki te są droższe gdyż koszty produkcji są wyższe. Można przypuszczać, że każda firma przed wprowadzeniem ich do produkcji, dokonała wszechstronnej analizy ekonomicznej. Bez względu na wynik takiej analizy wszyscy producenci liczników, którzy jeszcze stosują konwencjonalne łożyskowanie wirnika, w tym również producent krajowy, będą zmuszeni prędzej czy później wprowadzić łożyskowanie magnetyczne. T.W. Glyde [9] wspomina o trudnościach ze sprzedażą konwencjonalnych liczników od momentu, gdy na rynku brytyjskim pojawiły się liczniki z wirnikiem łożyskowanym magnetycznie. Setsuo Makino [8] wytyka producentom japońskim opóźnienie w stosunku do Stanów Zjednoczonych, gdzie produkuje się wyłącznie liczniki z wirnikiem łożyskowanym magnetycznie, podczas gdy w Japoni produkuje je tylko jedna firma.

#### LITERATURA

1. Boerdijk A.H. - Technical Aspects of Levitation. Philips Research Report 1956, R 284.
2. Beams J.W. - Magnetic Suspension for Small Rotors. The Review of Scientific Instruments 1950, vol. 21 No. 2.
3. Okress E.C. - Electromagnetic Levitation of Solid and Molten Metals. Journal of Applied Physics 1952, vol. 23 No. 5.
4. Tałałajew G.A. - O dołgowieczności szcotoznego mechanizma elektriczeskogo szcziotczika. Pribory i sistemy upravlenija 1971, No. 3.
5. Goryczka L. - Magnetlager in Elektrizitatszahlern. Elektrotechnik 1968 Bd. 50, No. 5.
6. Rostance J. - A magnetic bearing system for watt-hour meters. English Electric Journal 1968, vol. 23, No. 6.
7. Kinnard I.F. - A new Watt - hour Meter. Electrical Engineering 1948, vol. 67, No. 7.
8. Makino Setsuno - Watt-hour Meter. Japan Electronic Engineering 1969, No. 33.
9. Glyde T.W. Meter Bearing Systems. Electrical Power Engineer 1967, vol. 49, No. 3.

## ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

## Резюме

Проблема увеличения прочности многих устройств и приборов сводится к увеличению прочности подшипников. В статье приведено несколько конструкций магнитных подшипников, применяемых в счетчиках электрической энергии, а также рассмотрены перспективы в области увеличения прочности этих приборов.

## MAGNETIC BEARING SYSTEMS

## Summary

The article presents some constructions of the magnetic support bearing systems in watt-hour meters and shows their advantages. Magnetic suspension gives longer life of meters.