ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976

Seria: Elektryka z.53 Nr kol. 489

Zbigniew NIESTRAWSKI
Instytut Elektrotechniki WSI - Opole

POMIAR MOMENTU TARCIA W LICZNIKU ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Streszczenie. W artykule podano podstawy teoretyczne metody pomiaru momentu tarcia polegającej na wykorzystaniu licznika indukcyjnego jako silnika wzorcowego. Omówiono również praktyczne problemy realizacji pomiarów momentu tarcia w liczniku energii elektrycznej. Moment tarcia w liczniku rozpatruje się jako sumę momentów tarcia w łożyskach i momentu tarcia powietrza.

1. Wprowadzenie

Liczniki energii elektrycznej, to narzędzia pomiarowe o istotnej funkcji gospodarczej, produkowane wieloseryjnie i użytkowane w dużych ilościach. Wskazania liczników są podstawą rozliczeń finansowych, stąd duże wymagania dotyczące dokładności wskazań w obszarze mierniczym określonym najmniejszym i największym obciążeniem licznika, w obrębie których błędy podstawowe nie mogą przekraczać wartości określonych odpowiednimi przepisami [1, 2,3, 4, 5].

Warunki eksploatacyjne liczników narzucają konieczność możliwie największego rozszerzenia ich obszaru mierniczego. W ostatnich latach ukazują się w różnych krajach publikacje [6] wyników badań rozkładu poboru mocy przez odbiorców energii elektrycznej, z których wynika, że około 40 .. .. 50% energii zliczanej przez liczniki jest mierzona w początkowej części ich charakterystyki mierniczej, a więc w dolnym odcinku obszaru mierniczego. Przyczyną niedokładności pomiaru energii przez licznik jest występowanie dodatkowych momentów obok momentów podstawowych napędowego i hamującego. Takim momentem dodatkowym, zwiększającym niedokładność wskazań licznika przy małych obciążeniach jest moment tarcia w liczniku. Moment ten nieustannie zwiększa się podczas eksploatacji licznika, w miarę zużywania się współpracujących elementów liczydła i łożysk. Wartość momentu tarcia w liczniku może z biegiem czasu wzrosnąć tak bardzo, że błędy podstawowe licznika przy małych obciążeniach przekroczą wartości dopuszczalne, określone przez normy. Niestałość momentu tarcia w czasie jest więc jednym z czynników decydujących o trwałości licznika. Zwiększenie trwałości liczników, a więc możliwość wydłużenia ich okresu legalizacyjnego ma bardzo istotne znaczenie ekonomiczne i techniczne. W pracach naukowo-badawczych dotyczących trwałości liczników niezbędne są pomiary momentu tarcia w liczniku.

Istnieje kilka metod pomiaru momentu tarcia w przyrządach pomiarowych, które można podzielić na metody pośrednie [7, 8] i metody bezpośrednie [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], wśród których można rozróżnić metody mechaniczne i elektryczne. W metodach pośrednich moment tarcia określa się poprzez określenie strat energii kinetycznej wirnika w czasie. W metodach bezpośrednich badany moment tarcia określa się przez porównanie ze znanym momentem wzorcowym. Wśród metod bezpośrednich na szczególną uwagę zasługuje metoda pomiaru momentu tarcia, którą można nazwać metodą wzorcowego silnika. Metoda ta posiada szereg zalet decydujących o jej szczególnej przydatności do pomiaru momentu tarcia w liczniku energii elektrycznej.

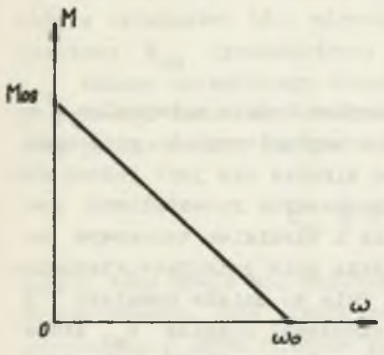
2. Teoretyczne podstawy metody pomiarowej

Metoda opiera się na teorii biegnącego pola magnetycznego w liczniku indukcyjnym [18, 9, 19, 20] i polega na wykorzystaniu systemu napędowego licznika do pomiaru momentu tarcia. H. Grosse - Brauckmann [9, 10] podał podstawy metody oraz stwierdził, że moment tarcia można określić z błędem około $\pm$ 5%. Nie podał jednak żadnej analizy właściwości i zakresu zastosowań tej metody. A. Podemski [14] przeprowadził analizę właściwości metody, określił zakres jej zastosowań, określił warunki, w których można realizować pomiary, podał wzór na obliczenie błędu granicznego systematycznego pomiaru momentu tarcia i omówił warunki minimalizacji błędów oraz zwrócił uwagę na znaczenie wpływu nieliniowości obwodów magnetycznych na dokładność wyników pomiarów.

W teorii pola biegnącego przyjmuje się, że jednofazowy licznik indukcyjny jest silnikiem indukcyjnym hamowanym magnesem trwałym. Uzwojenie tego silnika składa się z uzwojenia prądowego i napięciowego. Pola magnetyczne tego silnika zależne są od prądu i napięcia, które mogą zmieniać zarówno amplitudę jak i fazę, a więc amplitudy i fazy indukcji pól magnetycznych w szczelinie roboczej nie są stałe. Jest to jedna z cech odróżniających licznik od zwykłego silnika indukcyjnego. Licznik indukcyjny z wirnikiem tarczowym jest specyficznym silnikiem asynchronicznym również dlatego, że liczba biegunów jest nieparzysta, a ponadto rozkład biegunów wokół osi obrotu wirnika jest nierównomierny. Kolejną cechą odróżniającą licznik od zwykłego silnika jest to, że dla prądów indukowanych w aluminiowej tarczy, reaktancja jest pomijalnie mała w porównaniu z rezystancją i poślizg krytyczny ma wartość aż 2000%. Dlatego też moment napędowy wyrażony jako funkcja poślizgu sprowadza się do zależności proporcjonalnej. Stąd przedstawiona na rysunku 1 charakterystyka momentu napędowego jako funkcji prędkości kątowej wirnika jest linią prostą.

Moment napędowy M_o w liczniku indukcyjnym określa zależność [16,9,10]

$$M_o = c \left[n_s B_u B_I \cos\varphi - \frac{n}{2} (B_u^2 - B_I^2) \right], \qquad (1)$$



Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna momentu napędowego w liczniku indukcyjnym

przy czym:

c - stała zależna od konstrukcji licznika

n_s - maksymalna prędkość obrotowa wirnika

n - rzeczywista prędkość obrotowa wirnika

B_u, B_I - wartości indukcji pól magnetycznych wytwarzanych przez biegun obwodu napięciowego i bieguny obwodu prądowego.

$\cos\varphi$ - współczynnik mocy odbiornika obciążającego.

Ponieważ podczas pracy licznika obciążenie może się zmieniać, to w ogólności strumienie napięciowy i prądowy nie mają równych wartości. Z tego względu w szczelinie roboczej licznika istnieje nie pojedyncze pole biegnące, lecz dwa pola biegnące w przeciwnym kierunku. Ze względu na konstrukcję prądowego i napięciowego obwodu licznika, rozkład indukcji B_u oraz B_i w przestrzeni szczeliny roboczej jest niesinusoidalny. W konsekwencji na wirnik działają pola harmoniczne, wobec czego momenty pochodzące od tych pól zarówno współbieżnych jak i przeciwbieżnych działają w przeciwnych kierunkach. Moment napędowy określony równaniem (1) jest wypadkową szeregu momentu składowych sumujących się według praw superpozycji.
Można wyróżnić trzy główne składowe:

$$M_o = M_{os} - M_I - M_u, \tag{2}$$

przy czym:

M_{os} - moment obrotowy statyczny (przy n = 0)

M_I - moment tłumienia prądowego

M_u - moment tłumienia napięciowego

$$M_{os} = c\, n_s\, B_u\, B_I \cos\varphi \tag{3}$$

$$M_u = c\, \frac{n}{2}\, B_u^2 \tag{4}$$

$$M_I = c\, \frac{n}{2}\, B_I^2 \tag{5}$$

W liczniku, z którego usunięto magnes hamujący, prędkość obrotowa wirnika n ustala się, gdy suma momentów prawej strony równania (2)równa jest zero. Ustaloną w tych warunkach prędkość obrotową można określić po podstawieniu do równania (1) wartości M = 0. Wówczas

$$n = n_s \frac{2 B_u B_I \cos\varphi}{B_u^2 + B_I^2} \tag{6}$$

Z równania (6) wynika, że prędkość obrotowa wirnika będzie maksymalna $n = n_s$, gdy $B_u = B_I$, czyli gdy momenty tłumienia napięciowego i prądowego będą sobie równe. Maksymalna prędkość obrotowa wirnika nie jest jednak równa prędkości synchronicznej, ponieważ w dotychczasowych rozważaniach pominięto fakt, że w szczelinie roboczej licznika z wirnikiem tarczowym oprócz pól magnetycznych biegnących istnieje także pole pulsujące, stanowiące konsekwencję nieparzystej liczby biegunów. Pole to działa hamująco i wpływa na zmniejszenie maksymalnej prędkości obrotowej wirnika n_s, która jest mniejsza od prędkości synchronicznej. Maksymalna prędkość obrotowa wirnika, przy biegu jałowym w znacznym stopniu zależy od konstrukcji licznika i zawiera się zwykle w granicach (570÷950) obr/min.

Przy założeniu, że indukcja magnetyczna wytworzona przez obwód napięciowy jest proporcjonalna do napięcia ($B_u = c_1 U$) i że indukcja wytworzona przez obwód prądowy jest proporcjonalna do prądu ($B_I = c_2 I$), oraz po zastąpieniu prędkości obrotowej n prędkością kątową ω, równanie (6) przyjmuje postać

$$\omega_o = \omega_{om} \frac{2 C_{mo} \frac{I}{U} \cos\varphi}{1 + \left(C_{mo} \frac{I}{U}\right)^2} \tag{7}$$

przy czym:

$C_{mo} = \frac{c_2}{c_1}$ - stała zależna od konstrukcji licznika,

ω_{om} - maksymalna prędkość kątowa wirnika przy biegu jałowym.

Przy tych samych założeniach równanie (3) przyjmuje postać

$$M_{os} = C_{os} U I \cos\varphi = C_{os} P, \tag{8}$$

przy czym:

$C_{os} = c\, c_1\, c_2$ - współczynnik statycznego momentu obrotowego zależny od konstrukcji licznika

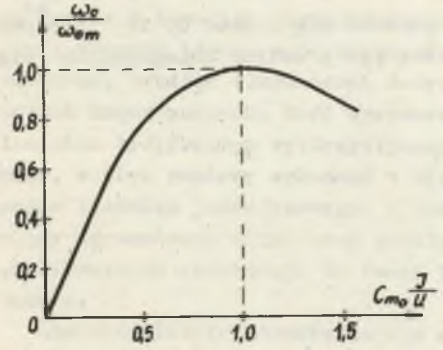
P - moc odbiornika obciążającego

Z równania (7) wynika, że prędkość kątowa wirnika przy biegu jałowym (bez hamowania wirnika przez magnes hamujący i liczydło) ω_o jest funkcją stosunku prądu w cewce prądowej do napięcia przyłożonego do cewki napięciowej i $\cos\varphi$, przy czym: $\varphi = \sphericalangle \hat{IU}$. Z równania (8) wynika, że moment obrotowy statyczny (przy zatrzymanym wirniku) M_{os} - jest proporcjonalny do mocy czynnej działającej na system napędowy licznika.

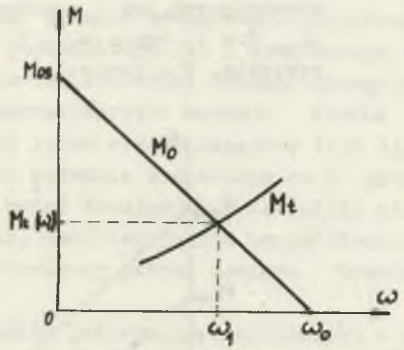
Współczynnik statycznego momentu obrotowego C_{os} wyznacza się na podstawie zależności (8), mierząc moc P watomierzem oraz statyczny moment obrotowy M_{os} dynamometrem. Określenie pozostałych dwóch stałych C_{mo} o ω_{om} wymaga uprzedniego eksperymentalnego wyznaczenia charakterystyki biegu jałowego licznika określonej równaniem (7), dla cos $\varphi = 1$, której przebieg przedstawiono na rysunku 2. Maksimum tej krzywej spełnia równanie:

$$C_{mo} \frac{I}{U} = 1 \quad \text{i stąd} \quad \omega_o = \omega_{om}$$

Dzięki temu staje się możliwe wyznaczanie wzorcowej charakterystyki momentu obrotowego, jaką przedstawiono na rysunku 1, która jest linią prostą przechodzącą przez wybrane punkty M_{os} i ω_o, w układzie współrzędnych M, ω. Zarówno charakterystykę biegu jałowego jak i wzorcową charakterystykę mechaniczną wyznacza się po usunięciu z licznika magnesu hamującego oraz liczydła.



Rys. 2. Charakterystyka biegu jałowego licznika, przy cos $\varphi = 1$



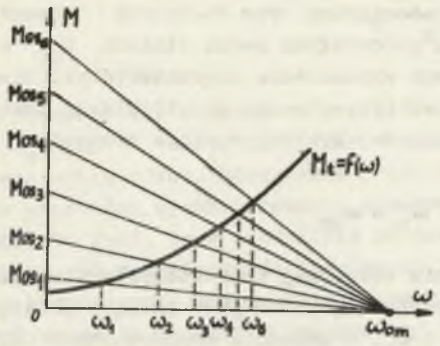
Rys. 3. Równowaga statyczna momentów: badanego i wzorcowego

Ze względu na istnienie momentu tarcia w liczniku, prędkość kątowa wirnika przy biegu jałowym nie osiąga prędkości ω_o, lecz ustala się wartość mniejsza ω_1, będąca wynikiem równowagi statycznej momentu obrotowego i momentu tarcia, co przedstawiono na rysunku 3. Mierząc prędkość kątową wirnika ω_1, wartość momentu tarcia można określić z prostej proporcji

$$\frac{M_t(\omega_1)}{\omega_o - \omega_1} = \frac{M_{os}}{\omega_o}$$

Po przekształceniu otrzymuje się wzór roboczy, na podstawie którego określa się moment tarcia w liczniku

$$M_t(\omega_1) = M_{os}\left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_o}\right) \qquad (9)$$

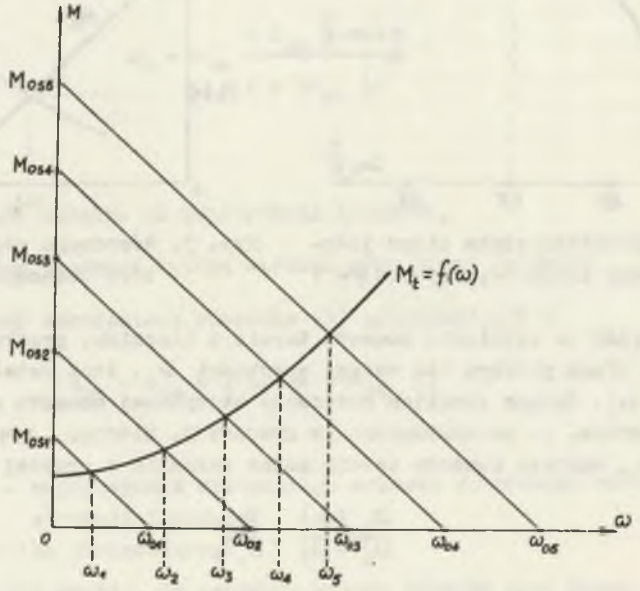


Rys. 4. Wyznaczanie charakterystyki momentu tarcia w liczniku przy wykorzystaniu rodziny charakterystyk wzorcowych stanowiących pęk prostych ($C_{mo}\frac{I}{U}=1$, $\cos\varphi = 1$, I = variable, U = variable)

Ponieważ wartość momentu tarcia w liczniku nie jest stała, lecz zależna od prędkości kątowej wirnika, celowe jest wyznaczanie charakterystyki momentu tarcia $M_t = f(\omega)$. W takim przypadku należy posłużyć się nie jedną charakterystyką wzorcową, lecz rodziną charakterystyk wzorcowych.

Można rozróżnić dwie rodziny charakterystyk wzorcowych, których wykorzystanie umożliwia spełnienie warunków minimalizacji błędu pomiaru momentu tarcia, podanych przez A. Podemskiego [14].

Jeśli podczas pomiarów zachowa się warunek: $\cos\varphi = 1$, $\frac{I}{U} = \frac{1}{C_{mo}}$, a zmieniá się I oraz U, to otrzyma się pęk prostych zbiegających się



Rys. 5. Wyznaczanie charakterystyki momentu tarcia w liczniku przy wykorzystaniu rodziny równoległych charakterystyk wzorcowych ($C_{mo}\frac{I}{U}=1$ U = const., I = const., $\cos\varphi$ = variable)

w leżącym na osi odciętych punkcie $\omega_c = \omega_{omax}$. Przypadek ten przedstawiono na rysunku 4. Odpowiednie wartości M_{osi} tych charakterystyk wyznacza się z równania (8). Mierząc odpowiednie wartości ω_i, przy czym i = 1, 2,... można na podstawie równania (9) wyznaczyć charakterystykę momentu tarcia.

Taką samą charakterystykę można wyznaczyć korzystając nie z rodziny charakterystyk wzorcowych stanowiących pęk prostych, lecz z charakterystyk stanowiących rodzinę prostych równoległych, przedstawionych na rysunku 5. W tym przypadku podczas pomiarów należy zachować warunek: U = const., I = = const., $C_{mo}\frac{I}{U} = 1$ i zmieniać jedynie cos φ. Wykorzystanie rodziny charakterystyk wzorcowych, stanowiących pęk prostych, bądź też rodziny wzorcowych charakterystyk równoległych oznacza jedynie zastosowanie jednego z dwóch wariantów tej samej metody pomiarowej.

3. Praktyczne wykorzystanie metody

Podczas pracy badawczej autor wyznaczył około stu charakterystyk momentu tarcia w liczniku, korzystając z metody silnika wzorcowego. Charakterystyki momentu tarcia w liczniku zarówno jednofazowym jak i trójfazowym wyznaczono, badając właściwości łożysk jednokamieniowych, dwukamieniowych i łożysk magnetycznych. Przy wyznaczaniu charakterystyk momentu tarcia w liczniku trójfazowym wykorzystywano tylko jeden system napędowy tego licznika, a więc pomiary wykonano w tym samym układzie pomiarowym co w przypadku licznika jednofazowego. W trakcie badań trwających przez kilka miesięcy zgromadzono kilka uwag praktycznych, umożliwiających uzupełnienie opublikowanych informacji na temat przedstawionej metody pomiaru momentu tarcia.

Charakterystyki momentu tarcia w liczniku jednofazowym wyznaczano w zakresie prędkości kątowych $0 < \omega \leq 18$ rad/s, a w liczniku trójfazowym w zakresie $0 \leq \omega \leq 12$ rad/s. Maksymalna prędkość kątowa wirnika licznika jednowazowego przy biegu jałowym wynosiła 82,5 rad/s, a w przypadku licznika trójfazowego 63,0 rad/s. Podczas pomiaru momentu tarcia według pierwszego wariantu metody, przy małych prędkościach kątowych wirnika, konieczne było stosowanie wartości U oraz I kilkadziesiąt razy mniejszych od wartości znamionowych. Z tego względu charakterystyki wzorcowe miały bardzo małe nachylenie względem osi odciętych i mały był moment ustalający. Ponieważ jednocześnie moment tarcia w łożyskach jest wielkością mało stabilną, ruch wirnika był niejednostajny. Powtarzając pomiar czasu trwania 10 obrotów wirnika, stwierdzono wyraźne różnice prędkości kątowej wirnika. W celu zmniejszenia błędów przypadkowych mierzono czas trwania dużej liczby obrotów. Po zakończeniu pomiaru jednej wartości momentu tarcia zmieniano U oraz I i oczekiwano około 15 minut na ustalenie się nowej wartości prędkości kątowej wirnika. Wadą takiego sposobu jest duża czasochłonność. Wyznaczenie kilkunastu (12 ÷ 15) punktów charakterystyki trwało około 8 godzin.

Przy zastosowaniu drugiego wariantu metody, równoległe charakterystyki

wzorcowe mają znacznie większe nachylenie, większy jest moment ustalający i problem niejednostajności prędkości kątowej wirnika nie jest tak istotny. Czas wyznaczenia podobnej liczby punktów charakterystyki $M_t = f(\omega)$ można skrócić do około 5 godzin. Wykorzystywanie drugiego wariantu metody jest celowe, gdy zachodzi konieczność wyznaczenia większej liczby charakterystyk momentu tarcia, ponieważ warunkiem poprawnego pomiaru jest zapewnienie przesunięcia kątowego między napięciowym i prądowym strumieniem systemu napędowego licznika $-\sphericalangle \Phi_U \widehat{\ } \Phi_I = 90^\circ$. Spełnienie tego warunku jest bardzo trudne, ponieważ pomiary przeprowadza się przy napięciu 20 - krotnie mniejszym od napięcia znamionowego i przy prądzie 5 - krotnie mniejszym od prądu znamionowego licznika. Przy tak małych wartościach U oraz I przesunięcie strumieni należy regulować tak, aby przy $\cos \varphi = 0{,}1$ wirnik obracał się w jedną stronę, a po zmianie fazy o 180° w drugą stronę z taką samą prędkością kątową. Wykonanie tego jest niezmiernie czasochłonne i pracochłonne, ponieważ urządzenia do regulacji przesunięcia kątowego strumieni dostosowane są do realizacji tego zadania przy większych wartościach napięcia i prądu.

Pomiary momentu tarcia wykonano, spełniając możliwie najdokładniej warunki minimalizacji błędu podane przez A. Podemskiego [14]. Błędy graniczne systematyczne pomiaru, obliczone ze wzoru podanego w pracy [14], mieszczą się w przedziale (3,4 ÷ 4,1)%. Błędy te można zmniejszyć, stosując dokładniejszy dynamometr zamiast stosowanego dynamometru kl. 2,0.

Niewątpliwie pracochłonność jest wadą przedstawionej metody, jednakże jej zalety są również godne uwagi. Do zalet można zaliczyć stosunkowo dużą dokładność, możliwość wyznaczania momentu tarcia w funkcji prędkości kątowej wirnika i wreszcie możliwość wykonania pomiarów bez konieczności stosowania specjalistycznej aparatury, a jedynie przy użyciu przyrządów łatwo dostępnych.

LITERATURA

[1] IEC Recomendation. 1964. Publ. 170. - Class 1,0 alternating - current watthour meters.

[2] PN - 70/E - 06504 - Liczniki indukcyjne energii elektrycznej czynnej oraz energii biernej.

[3] GOST 6570 - 60 - Sčetčiki električeskije peremennogo toka, Moskwa 1969.

[4] TGL 19 473 - Wechselstromzähler. Technische Forderungen, Berlin 1968.

[5] B.S. 37: Part 10: 1961 - Alternating Current High Precision Kilowatt - Hour Meters.

[6] Hemming B.: Ermittlung und Bedeutung des Registrierfehlers bei Elektrizitätszählern. Elektrizitätswirtschaft. 1972, Jg.71, H.10, s. 270--273.

[7] Vostroknutov N.T., Ilukovič A.M.: Ispitane električeskich sčetčikov. Gosenergoizdat, Moskwa 1961, s. 172 - 189.

[8] Hilgebrand S.: Zur frage magnetisch entlaster Lager. Feinwerktechnik, 1964, Jg. 68, H.9, s. 387.
[9] Grosse - Brauckmann H., Hueter E.: Über die Drehfeldtheorie des Wechselstromzählers, ETZ-A, 1953, H.17, s. 505 - 508.
[10] Grosse - Brauckmann H.: Ermittlung der Reibung und anderer Bremsmomente im Induktionszähler und bei feinmechanischen Getrieben, ATM,1955, L. 234, s. 165 - 168.
[11] Calikowski R.: Wyniki pomiarów momentu tarcia wiertnego w łożyskach z czopami kulistymi, obciążonymi siłą osiową, PAK, 1958, Z. 5/6, s. 301 - 302.
[12] Fischer E.: Einfache labormässige Methoden zur Ermittlung kleiner Momente, Feinwerktechnik, 1959, Jg.63, H.3, s. 75 - 81.
[13] Fischer E.: Zur Bestimmung kleiner Beschleuningungs -, Stell - und Übertragungsmomente, Feinwerktechnik, 1965, Jg.69, H.7, s. 293 - 296.
[14] Podemski A.: Use of induction mechanism of kilowatt - hour meters of torque measurements. Proc. IEE, 1968, vol. 115. No. 11, s. 1721 - 1725.
[15] Kanapenas R.W.: Issledovanie momenta saprotivlenija vraščeniju v oporach èlektrosčetčikov indukcionnoj sistemy, Vibrotechnika, 1969,3(8), s. 187 - 193.
[16] Telschow J.: Messeinrichtungen zur Bestimmung kleinster Reibungsmomente an Zapfenlagern. VDI - Berichte, 1970, No. 144, s. 13 - 18.
[17] Dziewanowski T., Zieliński J.: Nowa metoda i urządzenie do pomiaru momentu tarcia spoczynkowego, PAK, 1973, No. 11, s. 504 - 506
[18] Peters W.: Neue Erkenntinsse in der Theorie elektrischer Induktionszähler, Deutsche Elektrotechnik, 1952, No5, s.203.
[19] Barlow H.E.M.: Travelling - field theory of induction - type instruments and motors. Proc. IEE, 1965, vol. 112, No.6, s. 1028 - 1214.
[20] Podemski A.: Existing theories of operation of induction meters.Proc. IEE, 1965, vol. 112, No.8, s. 1595 - 1600.
[21] Metal A., Żuchowski A.: Mierniki elektryczne. Obliczanie i konstrukcja, PWN, Warszawa 1969.

ИЗМЕРЕНИЕ МОМЕНТА ТРЕНИЯ В СЧЕТЧИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Р е з ю м е

В статье даны теоретические основы метода измерения момента трения, заключающегося в использовании индукционного счетчика, являющегося эталонным двигателем.
Разработаны также практические проблемы выполнения измерений момента трения в счетчике электрической энергии. Момент трения в счетчике рассматривается как сумму моментов трения в опорах и момента трения воздуха.

MEASUREMENTS OF THE FRICTION TORQUE IN WATT-HOUR METER

S u m m a r y

The article presents the theoretical basis of the measurement method of friction torque in watt-hour meter and some practical aaspects of carrying out measurements like using an induction meter as the standard motor. A friction torque in watthour meter means here the sum of friction torque in bearings and friction torque of the air.