ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1984

Seria: AUTOMATYKA z. 73 Nr kol. 798

Krystian KUSIDŁO

WPŁYW NIECENTRYCZNEGO PROWADZENIA NURNIKA NA PRACĘ ELEKTROMAGNESU PRĄDU STAŁEGO

Streszczenie. W artykule omówiono wpływ niecentrycznego prowadzenia nurnika na wartość siły tarcia występującej między nurnikiem a jego prowadzeniem. Wyprowadzono ogólny wzór pozwalający dobrać, już na etapie konstruowania, odpowiednie tolerancje wykonania nurnika i tulei prowadzącej w zależności od założonej, dopuszczalnej siły tarcia.

1. WSTĘP

Obiektem rozważań będzie jednouzwojeniowy elektromagnes prądu stałego z rdzeniem wciąganym. Można w nim wyróżnić następujące dwa rodzaje pracy: praca proporcjonalno-przekaźnikowa i praca przekaźnikowa [1]. Szczególnie interesujący jest pierwszy rodzaj pracy ze względu na możliwość uzyskania sterowanych napięciem ciągłych przemieszczeń nurnika. Największy możliwy do uzyskania zakres pracy proporcjonalnej x_m wynosi [1]:

$$x_m = \frac{X}{3} - \frac{2}{3}\frac{f_z}{k} \quad [m], \tag{1}$$

gdzie:

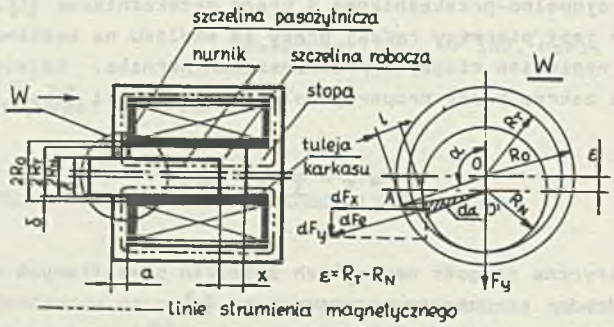
- X - sumaryczna długość wszystkich szczelin powietrznych występujących na drodze strumienia magnetycznego [m];
- f_z - zewnętrzna siła przyłożona do nurnika [N];
- k - sztywność sprężyny zwrotnej [N/m].

Przytoczona zależność wskazuje na możliwość uzyskania pracy proporcjonalnej w zakresie kilku milimetrów. Pozwala to na zastosowanie elektromagnesów prądu stałego jako elementów przekształcających w sposób ciągły napięcie (lub prąd) na przesunięcie nurnika, np. do sterowania zaworów hydraulicznych. Jak wykazały badania przeprowadzone dla konkretnego elektromagnesu [2] decydujące znaczenie dla uzyskania powtarzalnego zakresu pracy proporcjonalnej ma tarcie suche występujące między nurnikiem a jego prowadzeniem w postaci tulei karkasu.

2. WPŁYW NIECENTRYCZNEGO PROWADZENIA NURNIKA NA SIŁĘ TARCIA

W przypadku braku odpowiedniego prowadzenia nurnika i zbyt dużych tolerancji wymiarów siła tarcia może być tak duża, że uzyskanie powtarzalnego zakresu pracy proporcjonalnej może być niemożliwe [2]. Wystąpi zakleszczanie się nurnika. Na skutek tego nurnik przy zwiększaniu napięcia zasilającego uzwojenie magnesujące jest przyciągany do przypadkowego położenia stabilnego, a przy dalszym wzroście napięcia przemieszcza się skokowo do położenia odpowiadającego zerowej długości roboczej szczeliny powietrznej. Na rys. 1 przedstawiono model elektromagnesu z niecentrycznym prowadzeniem nurnika. W celu ilościowego określenia siły tarcia zostają przyjęte następujące założenia:

a) wszystkie powierzchnie walcowe są walcami idealnymi;
b) tuleja karkasu i otwór w magnetowodzie, przez który wychodzi nurnik są współosiowe;
c) rozpływ strumieni magnetycznych jest taki jak na rys. 1;
d) osie symetrii nurnika i tulei karkasu przebiegają równolegle w odległości $\varepsilon = R_T - R_N$;
e) długość pasożytniczej szczeliny powietrznej w dowolnym jej miejscu jest różna od zera.



Rys. 1. Model elektromagnesu z niecentrycznie prowadzonym nurnikiem

Siła tarcia jest równa geometrycznej sumie promieniowych sił rozłożonych wzdłuż pasożytniczej szczeliny powietrznej, pomnożonej przez odpowiedni współczynnik tarcia μ_T. Niecentryczne prowadzenie nurnika powoduje, że rozkład wartości sił promieniowych jest nierównomierny. Prowadzi to do przyciągania nurnika w kierunku, na którym leży najmniejsza wartość pasożytniczej szczeliny (kierunek osi y).

W celu obliczenia siły przyciągania nurnika do tulei karkasu zostanie wykorzystany ogólny wzór na siłę pochodzenia elektrycznego, jaką rozwija nurnik podczas normalnej pracy elektromagnesu. Dla stanu ustalonego obowiązuje zależność:

$$F_e = \frac{\mu_o \cdot (Iz)^2 \cdot s}{2X^2} \quad [N] \tag{2}$$

gdzie:

μ_o - przenikalność magnetyczna próżni [H/m];
Iz - amperozwoje uzwojenia magnesującego [A];
s - pole powierzchni szczeliny powietrznej [m^2].

Na podstawie rys. 1 i przyjętych tam oznaczeń można wypisać następujące zależności:

$$X = x + l \tag{3}$$

$$\varepsilon = R_T - R_N \quad [m] \tag{4}$$

Korzystając z twierdzenia cosinusów i uwzględniając, że $R_O \gg \varepsilon$

$$l = \varepsilon \cdot \cos\alpha + R_O - R_N \tag{5}$$

$$ds = a \cdot R_N \cdot d\alpha \tag{6}$$

Z warunku równomiernego przekroju magnetowodu wynika, że

$$a = \frac{R_N}{8} \tag{7}$$

Dalej na podstawie rys. 1 można podać następujące zależności:

$$dF_y = dF_e \cdot \cos\alpha \tag{8}$$

$$F_T = \mu_T \cdot F_y \tag{9}$$

Ostatecznie na podstawie wzorów od (2) do (9) otrzymano następujące wyrażenie na siłę tarcia F_T:

$$F_T = \frac{\mu_o \cdot \mu_T \cdot (Iz)^2 \cdot R_N^2}{16} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\alpha}{(x + R_O - R_N + \varepsilon \cdot \cos\alpha)^2} d\alpha \tag{10}$$

Po wykonaniu całkowania otrzymujemy [3]

$$F_T = \frac{\pi \cdot \mu_o \cdot \mu_T \cdot (Iz)^2 \cdot R_N^2}{8} \frac{\varepsilon}{[(x + R_O - R_N)^2 - \varepsilon^2]^{1,5}} \tag{11}$$

Aby można było wyciągnąć ilościowe i praktyczne wnioski dla dowolnego elektromagnesu, należy dokonać unormowania zależności (11). W tym celu wprowadzono do niej dwa poniższe związki:

$$R_0 = R_T + \delta \quad [m], \tag{12}$$

$$\Delta = x + \delta \quad [m], \tag{13}$$

gdzie:

δ - grubość pierścienia niemagnetycznego osadzonego w otworze magnetowodu pasożytniczej szczeliny powietrznej i zapobiegającego przyklejaniu się nurnika do magnetowodu;

Δ - sumaryczna długość roboczej i pasożytniczej szczeliny powietrznej w przypadku elektromagnesu z centrycznie prowadzonym nurnikiem ($\varepsilon = 0$).

$$F_T = \frac{\pi \mu_0 \mu_T (Iz)^2 R_N^2}{8} \frac{\varepsilon}{(\Delta^2 + 2 \cdot \Delta \cdot \varepsilon)^{1,5}} \tag{14}$$

Dla określenia procentowego udziału siły tarcia w całkowitej sile rozwijanej przez elektromagnes idealny, tzn. taki, w którym nurnik jest prowadzony centrycznie, wprowadza się pojęcie względnego błędu siły zdefiniowanego w sposób następujący:

$$\delta F = \frac{F_{ei} - (F_{ei} - F_T)}{F_{ei}} 100\% = \frac{F_T}{F_{ei}} 100\%, \tag{15}$$

gdzie:

F_{ei} - siła pochodzenia elektrycznego rozwijana przez nurnik elektromagnesu idealnego, siła ta jest określona następującym wzorem:

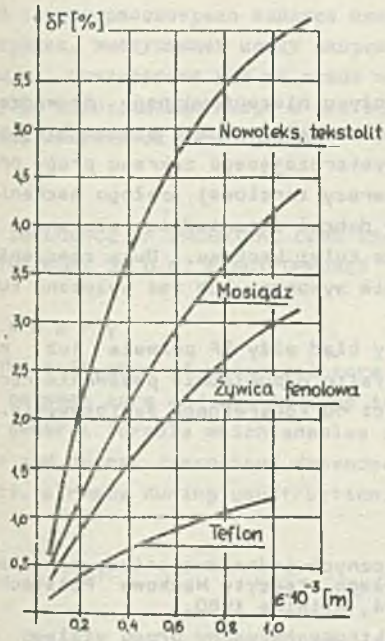
$$F_{ei} = \frac{\mu_0 (Iz)^2 R_N}{8} \frac{1}{\Delta^2} \tag{16}$$

Podstawiając zależności (14) i (16) do (15) otrzymujemy ogólne wyrażenie określające δF

$$\delta F = \mu_T \cdot \varepsilon \sqrt{\frac{\Delta}{(\Delta + 2 \cdot \varepsilon)^3}} 100\% \tag{17}$$

Wzór ten jest uniwersalny, ponieważ jest niezależny od wszystkich cech konstrukcyjnych elektromagnesu z wyjątkiem tolerancji wykonania nurnika względem tulei karkasu. W celu porównywania różnych rozwiązań konstrukcyj-

nych elektromagnesu przyjmuje się, że $\Delta = 5.10^{-3}$ [m]. Uniezależniamy się wtedy od grubości δ pierścienia niemagnetycznego, która w zależności od warunków technologiczno-materiałowych może być różna. Na rys. 2 przedstawiono graficzną interpetację zależności (17). Poszczególne krzywe odpowiadają różnym materiałom, z których jest wykonana lub wyłożona tuleja karkasu. Nurnik zawsze jest wykonany z materiałów magnetycznie miękkich, których właściwości tarciowe są podobne do tych, jakie posiada stal niskowęglowa. Dlatego wykresy sporządzono przy założeniu, że nurnik został wykonany ze stali. Należy zaznaczyć, że z grupy materiałów miękkich wykluczono ferryty ze względu na ich niekorzystne własności mechaniczne. Przyjęte współczynniki tarcia μ_T odpowiadają doskonale wypolerowanym powierzchniom współpracującym. W praktyce na rzeczywistą wartość współczynnika tarcia ma wpływ czystość i chropowatość powierzchni, kierunek występujących nierówności i technologia wykonania [4]. Dlatego odczytane z rys. 2 wartości względnego błędu siły będą w rzeczywistości większe. Należy więc dążyć do nadania współpracującym powierzchniom nurnika i karkasu jak największej gładkości. Praktyczne wykorzystanie rys. 2 w procesie projektowania elektromagnesu powinno być następujące. Po obliczeniu magnetowodu i określaniu danych nawojowych [5], [6] konstruktor określa górną, dopuszczalną wartość względnego błędu siły w odniesieniu do założonej histerezy tarciowej lub też energetycznych strat tarciowych. Następnie z wykresu odczytuje odpowiednie δ i tym samym określa dopuszczalny luz promieniowy, który stanowi podstawę doboru odpowiednich tolerancji wykonania nurnika i tulei karkasu. Oczywiście w trakcie obliczeń wymiarów magnetowodu należy przyjmować wartość δ jako najmniejszą z możliwych do technicznej realizacji, gdyż ma ona wpływ na wartość siły rozwijanej przez nurnik elektromagnesu, wzór (16). Na zakończenie należy jeszcze zwrócić uwagę na efekt występowania poduszki powietrznej między nurnikiem a stopą. Przy coraz mniejszych tolerancjach, a więc i mniejszych siłach tarcia opór ruchu nurnika, który coraz skuteczniej będzie pełnił rolę tłoka w zamkniętym cylindrze, będzie wzrastał. Aby temu zapobiec, można wykonać w



Rys. 2. Procentowa wartość względnego błędu siły w funkcji ε dla różnych materiałów, z których jest wykonana tuleja karkasu

stopie magnetowodu otwór odpowietrzający. Jego średnica powinna być określona wydajnością odpowietrzania i minimalnym spadkiem permeancji wypadkowej magnetowodu.

3. WNIOSKI

a) Na podstawie przeprowadzonej analizy wpływu niecentrycznego prowadzenia nurnika na pracę elektromagnesu prądu stałego można stwierdzić, że istnieją realne możliwości uzyskania wystarczającego zakresu pracy proporcjonalnej jak też zmniejszenia histerezy tarciowej całego mechanizmu elektromagnetycznego. Należy tylko dobrać odpowiednie tolerancje i technologię wykonania nurnika i wnętrza tulei karkasu. Duże znaczenie ma też wybór materiału, z jakiego będzie wykonana lub też wyłożona tuleja.

b) Zaproponowany wzór określający względny błąd siły δF pozwala już na etapie konstruowania elektromagnesu ustalić odpowiednie pasowanie nurnika względem tulei karkasu w zależności od konkretnego zastosowania.

LITERATURA

[1] Bortliczek Z.: O właściwościach statycznych jednouzwojeniowych mechanizmów elektromagnetycznych prądu stałego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Automatyka, nr 54, Gliwice 1980.

[2] Kusidło K.: Uniwersalny mechanizm elektromagnetyczny prądu stałego - projekt, wykonanie, badania sprawdzające. Praca magisterska.Politechnika Śląska, Wydz. Automatyki i Informatyki, 1980.

[3] Bronsztejn I.N.: Matematyka, poradnik encyklopedyczny. PWN, Warszawa 1973.

[4] Solski P., Zięba S.: Zagadnienia tarcia suchego. PWN, Warszawa 1965.

[5] Kowalowski H.: Maszyny i napęd elektryczny. PWN, Warszawa 1975.

[6] Liubczik M.A.: Siłowyje elektromagnity aparatow i ustrojstw awtomatiki postojannowo toka. Izdatielstwo Eniergija, Moskwa 1968.

Recenzent: Prof. dr inż. Zygmunt Bajorek

Wpłynęło do Redakcji: wrzesień 1983 r.

ВЛИЯНИЕ НЕАКСИАЛЬНОГО ВЕДЕНИЯ ЯКОРЯ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р е з ю м е

В статье рассмотрено влияние неаксиального ведения якоря на величину силы трения, выступающей между якорем а его ведущей втулкой. Выведена общая формула, позваляющая уже на этапе конструирования подобрать соответствующие допуски изготовления якоря и его ведущей гильзы, в зависимости от предполагаемой допустимой силы трения.

THE INFLUENCE OF UNCENTRAL CORE LEADING ON THE WORK OF O.C. ELECTROMAGNET

S u m m a r y

The influence of uncentral core leading on the value of friction forces between core and its leading is discussed in this article.It is shown the general formula which enables choice of the appropriate tolerances of core and barrel dimensions depended on assumed and permissible friction force, already during construction.