

Zbigniew BORTLICZEK

C BEZWYMIAROWYCH CHARAKTERYSTYKACH DYNAMICZNYCH JEDNOUZOJENIOWYCH MECHANIZMÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH PRĄDU STAŁEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę właściwości dynamicznych jednouzwojeniowych mechanizmów elektromagnetycznych prądu stałego metodą wielkości względnych. Wyprowadzono równania bezwymiarowych charakterystyk dynamicznych przetwornika. Podano przykłady takich charakterystyk.

1. Uwagi wstępne

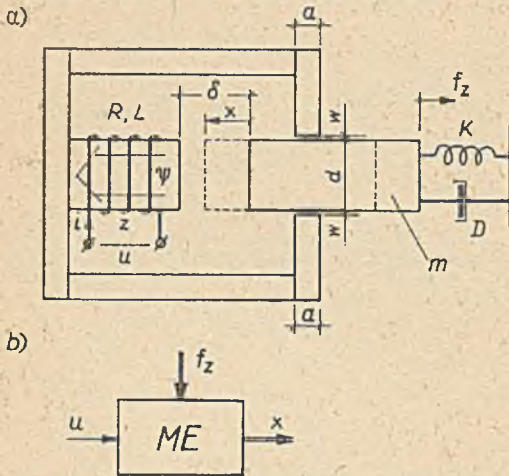
W elektromechanice do analizy właściwości statycznych i dynamicznych maszyn i urządzeń wykorzystuje się chętnie wielkości (jednostki) względne [6]. Liczne przykłady analizy właściwości elektromaszynowych elementów automatyki metodą wielkości względnych można znaleźć w monografiach z tej dziedziny (np. [1], [5]). W pracy [3] autor wykorzystał wielkości względne do analizy właściwości statycznych pewnej klasy mechanizmów elektromagnetycznych. Celem niniejszej publikacji jest opis i analiza przy pomocy wielkości względnych właściwości dynamicznych mechanizmów elektromagnetycznych.

2. Równania wyjściowe

A. Obiektem, którego właściwości dynamiczne chcemy badać, jest przedstawiony na rys. 1a przetwornik energii elektrycznej na mechaniczną, zwany dalej jednouzwojeniowym mechanizmem elektromagnetycznym prądu stałego (w skrócie - ME), posiadający następujące cechy konstrukcyjne [1]:

1. Obwód magnetyczny ME składa się z części nieruchomej (jarzmo i rdzenie) i części ruchomej (rdzeń), które rozdziela szczelina o zmiennej głębokości δ -x.
2. Jarzmo i rdzeń wykonane są z materiału ferromagnetycznego.
3. Uzwojenie wzbudzające ME o liczbie zwojów i rezystancji R zasilane jest ze źródła napięcia stałego.
4. Rdzeń o masie m , obciążony siłą zewnętrzną f_z , może się poruszać ruchem postępowym prostoliniowym. Długość szczeliny w jest stała. Położenie początkowe rdzenia określa szczelina δ . Ruchowi rdzenia przeciwdziałają sprężyna o sztywności K oraz tarcie lepkie wyrażone przez rezystancję mechaniczną D .

Właściwości dynamiczne opisanego wyżej ME badać będziemy przyjmując, że zmienną wejściową jest napięcie u doprowadzone do uzwojenia wzbudzającego, a zmienną wyjściową - położenie x rdzenia (rys. 1b).



B. Rozpatrywać będziemy model elementarny ME, wyprowadzony w [2] gdzie założono, że w rzeczywistym ME pominąć można:

- 1) nieliniowości materiałowe,
- 2) zniekształcenia linii pola magnetycznego wokół szczelin,
- 3) rozproszenie linii pola magnetycznego,
- 4) reluktancję części ferromagnetycznych.

Stan równowagi dynamicznej tak uproszczonego przetwornika opisują następujące równania:

$$u = Ri + e \quad (1)$$

$$f_e - f_z = Kx + D \frac{dx}{dt} + m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2)$$

gdzie:

$$e = \frac{d\psi}{dt} \quad (3)$$

- napięcie wyindukowane w uzwojeniu wzbudzającym,

$$f_e = - \frac{\partial W_m(\psi, x)}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\psi id\psi \quad (4)$$

- siła pochodzenia elektrycznego działająca na rdzeń.

W wyrażeniach powyższych ψ oznacza liniozwoje uzwojenia wzbudzającego, i - prąd w tym uzwojeniu, W_m - energię magnetyczną, t - czas.

Zgodnie z przyjętymi założeniami

$$\psi = L(x) i \quad (5)$$

gdzie:

$$L(x) = z^2 \frac{\mu_0^B}{\Delta - x} \quad (6)$$

- indukcyjność własna uzwojenia wzbudzającego, przy czym (por. z rys. 1a)

$$\Delta = \delta + w \quad (7)$$

$$s = \frac{\pi d^2}{4} = \pi(d + w) a \quad (8)$$

oraz μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni. Na tej podstawie

$$i = \frac{\psi}{L(x)} = \frac{\psi}{L_0} - \frac{\psi x}{L_0 \Delta} \quad (9)$$

oraz

$$f_e = - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\psi id\psi = \frac{\psi^2}{2L_0 \Delta} \quad (10)$$

gdzie

$$L_0 = \left\{ L(x) \right\}_{x=0} = z^2 \frac{\mu c^2}{\Delta} \quad (11)$$

Podstawiając (9) i (10) do równań (1) i (2) otrzymujemy:

$$u = \frac{R}{L_0} \psi - \frac{R}{L_0 \Delta} \psi x + \frac{d\psi}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{\psi^2}{2L_0\Delta} - f_z = Kx + D \frac{dx}{dt} + m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (13)$$

Oznaczmy:

$$u = u_{\text{dop}} \psi \quad (14)$$

$$i = i^* \tau \quad (15)$$

$$\psi = \psi^* \psi \quad (16)$$

$$x = \Delta \xi \quad (17)$$

$$t = T\tau \quad (18)$$

gdzie u_{dop} - największa dopuszczalna wartość napięcia u oraz

$$i^* = \frac{u_{\text{dop}}}{R} \quad (19)$$

$$\psi^* = \left\{ \psi \right\}_{\substack{u=u_{\text{dop}} \\ x=0}} = L_0 i^* = \frac{L_0}{R} u_{\text{dop}} = T u_{\text{dop}} \quad (20)$$

$$T = \frac{L_0}{R} \quad (21)$$

Podstawiając (14), (15), (16), (17), (18) do (12), (13), (9) otrzymujemy:

$$\psi = \psi - \psi \xi + \frac{d\psi}{d\tau} \quad (22)$$

$$\psi^2 - \varphi_z = \kappa \xi + \lambda \frac{d\xi}{d\tau} + \nu \frac{d^2\xi}{d\tau^2} \quad (23)$$

oraz

$$i = (1 - \xi) \psi \quad (24)$$

gdzie:

$$\varphi_z = \frac{f_z}{f_e^*} \quad (25)$$

$$\kappa = K \frac{\Delta}{f_e^*} \quad (26)$$

$$\lambda = D \frac{\Delta}{T f_e^*} \quad (27)$$

$$\nu = m \frac{\Delta}{T^2 f_e^*} \quad (28)$$

oraz

$$f_e^* = \left\{ f_e \right\}_{\substack{u=u_{\text{dop}} \\ x=0}} = \left\{ f_e \right\}_{\psi=\psi^*} = \frac{(\psi^*)^2}{2L_0\Delta} \quad (29)$$

Równania (22), (23) i (24) są równaniami stanu nieustalonego ME w postaci bezwymiarowej. Zmienne ψ, ψ, i, ξ oraz τ przedstawiają względne wartości zmiennych u, ψ, i, x oraz t ; φ_z jest względną siłą zewnętrzną, κ - względną sztywnością sprężyny, λ - względną rezystancją mechaniczną, ν - względną masą. W dalszym ciągu opisując powyższe wielkości słowo "względny" będziemy pomijać.

3. Próba rozwiązania równań wyjściowych

A. Daleszą analizę ograniczymy do wyprowadzenia równań bezwymiarowych charakterystyk dynamicznych ME, które zdefiniujemy jako odpowiedzi przetwornika w postaci funkcji $\xi(\tau)$, $\psi(\tau)$ oraz $l(\tau)$ na wymuszenie skokowe $v(\tau) = v_0 \cdot K(\tau)$ przy $v = \text{const}$ oraz $\varphi_z = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$.

Równania opisujące bezwymiarowe charakterystyki dynamiczne w takiej postaci są rozwiązaniami równań wyjściowych (22), (23) i (24). Rozwiązania tych będziemy poszukiwać przyjmując, że zasilanie i obciążenie ME tak dobrano, iż działa on jako przekładnik. Zgodnie z [3] oznacza to, że w stanie ustalonym

$$v_d < v_0 \leq 1 \quad (30)$$

gdzie

$$v_d = \sqrt{\varphi_z} \quad \text{dla} \quad \lambda \leq 2\varphi_z \quad (31)$$

$$v_d = \sqrt{\frac{4}{27} \frac{(\lambda + \varphi_z)^3}{\lambda^2}} \quad \text{dla} \quad \lambda > 2\varphi_z \quad (32)$$

przy czym $0 \leq \varphi_z < 1$ oraz $0 < \lambda < 6,75$.

Wykorzystamy również znany z doświadczenia fakt, iż odpowiedź na wymuszenie skokowe ME działającego jak przekładnik przebiega w trzech następujących po sobie przedziałach czasu τ . Są to:

- przedział I dla $0 < \tau < \tau_{ro}$, w którym siła pochodzenia elektrycznego jest $\varphi_e < \varphi_z$, wobec czego rdzeń jest nieruchomy:

$$\xi(\tau) = \frac{d\xi(\tau)}{d\tau} = \frac{d^2\xi(\tau)}{d\tau^2} = 0 \quad (33)$$

- przedział II dla $0 < \tau < \tau_{ru}$, gdzie $\tau' = \tau - \tau_{ro}$, w którym $\varphi_e > (\varphi_z + \lambda\xi)$ a więc rdzeń porusza się, a jego położenie zmienia się w granicach

$$0 < \xi(\tau) < \xi_g \quad (34)$$

- przedział III dla $0 < \tau' < \infty$, gdzie $\tau' = \tau - \tau_{ru} = \tau - \tau_d$, w którym $\varphi_e > (\varphi_z + \lambda\xi)$, ale rdzeń znajduje się w skrajnym położeniu końcowym, to znaczy

$$\xi(\tau') = \xi_g \quad (35)$$

oraz

$$\frac{d\xi(\tau')}{d\tau'} = \frac{d^2\xi(\tau')}{d(\tau')^2} = 0 \quad (36)$$

W powyższych wzorach τ_{ro} oznacza czas rozruchu ME, τ_{ru} - czas ruchu,

$$\tau_d = \tau_{ro} + \tau_{ru} \quad (37)$$

- czas zadziałania ME, zaś

$$\xi_g = \left\{ \xi \right\}_{x=\delta} = \frac{\delta}{\Delta} = \frac{\delta}{\delta + w} \quad (38)$$

B. Zgodnie z (33) w przedziale I obowiązuje równanie:

$$v = v + \frac{dv}{d\tau} \quad (39)$$

Warunki początkowe dla przedziału I są zerowe, zatem zgodnie z (39) w przedziale tym liniozwoje nadržastają wykładniczo według zależności:

$$\psi(\tau) = \psi_0(1 - e^{-\tau}) \quad (40)$$

a ponieważ w chwili $\tau = \tau_{ro}$ siła pochodzenia elektrycznego

$$\varphi_n = \psi^2 = \varphi_z \quad (41)$$

to
$$\psi_{ro} = \left\{ \psi(\tau) \right\}_{\tau = \tau_{ro}} = \psi_0(1 - e^{-\tau_{ro}}) = \sqrt{\varphi_z} \quad (42)$$

oraz

$$\tau_{ro} = \ln \frac{\psi_0}{\psi_0 - \sqrt{\varphi_z}} \quad (43)$$

Wykres zależności $\tau_{ro}(\varphi_z)$ dla $\psi_0 = 1$ przedstawia rys. 2.

Prąd w uzwojeniu wzbudzącym obliczymy zgodnie z (24), (33) i (40):

$$i(\tau) = \psi(\tau) \quad (44)$$

Oczywiście

$$i_{ro} = \left\{ i(\tau) \right\}_{\tau = \tau_{ro}} = \psi_{ro} = \sqrt{\varphi_z} \quad (45)$$

C. W przedziale II (rdzeń w ruchu) obowiązują równania (22) i (23), które tu przepisujemy w postaci następującej:

$$\frac{d\psi}{d\tau} = \psi - (1 - \xi)\psi \quad (46)$$

Rys. 2. Wykres zależności $\tau_{ro}(\varphi_z)$ dla $\psi_0 = 1$

$$\frac{d^2\xi}{d(\tau')^2} = \frac{1}{\psi} (\psi^2 - \varphi_z - \lambda\xi - \lambda \frac{d\xi}{d\tau'}) \quad (47)$$

Rozwiązani równań (46) i (47) poszukiwać będziemy metodą szeregów potęgowych, według której można założyć (por. np. w [4]), iż lokalnie, w pewnym bliskim otoczeniu punktu $\tau' = 0$

$$\xi(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n(\tau')^n \quad (48)$$

$$\psi(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n(\tau')^n \quad (49)$$

gdzie

$$\alpha_n = \frac{\xi^{(n)}(0)}{n!} \quad (50)$$

$$\beta_n = \frac{\psi^{(n)}(0)}{n!} \quad (51)$$

oraz $\xi^{(n)}(0)$, $\psi^{(n)}(0)$ - n-te pochodne funkcji $\xi(\tau')$, $\psi(\tau')$ względem τ' dla $\tau' = 0$. Wartości tych pochodnych można wyznaczyć z równań wyjściowych przez kolejne różniczkowanie i podstawianie warunków początkowych^{x)}.

^{x)} Inne ujęcie zastosowania metody szeregów potęgowych do rozwiązywania równań dynamiki ME - nie zawsze zgodne z jej założeniami - można znaleźć w monografii [7].

Wyznamy wartości pochodnych $\xi^{(n)}(0)$ i $\psi^{(n)}(0)$. W tym celu zauważamy najpierw, że warunki początkowe dla przedziału II są następujące:

$$\xi(0) = \left\{ \xi(\tau') \right\}_{\tau'=0} = 0 \quad (52)$$

$$\xi^{(1)}(0) = \left\{ \frac{d\xi(\tau')}{d\tau'} \right\}_{\tau'=0} = 0 \quad (53)$$

oraz

$$\psi(0) = \left\{ \psi(\tau') \right\}_{\tau'=0} = \psi_{ro} = \sqrt{\varphi_z} \quad (54)$$

a ponadto, na podstawie (52), (53), (54) i (47)

$$\xi^{(2)}(0) = \left\{ \frac{d^2\xi(\tau')}{d(\tau')^2} \right\}_{\tau'=0} = 0 \quad (55)$$

Z kolei na podstawie równania (46) otrzymujemy:

$$\psi^{(1)}(0) = \left\{ \nu^2 - \psi + \psi \xi \right\}_{\tau'=0} = \nu_0 - \psi(0) \quad (56)$$

$$\psi^{(2)}(0) = \left\{ -\psi^{(1)} + (\psi \xi)' \right\}_{\tau'=0} \quad (57)$$

i ogólnie dla $n = 2, 3, 4, 5, \dots$

$$\psi^{(n)}(0) = \left\{ -\psi^{(n-1)} + \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k} \psi^{(k)} \xi^{(n-k-1)} \right\}_{\tau'=0} \quad (58)$$

Podobnie na podstawie równania (47) dla $n = 3, 4, 5, \dots$

$$\xi^{(n)}(0) = \left\{ \frac{1}{\nu} \left[\sum_{k=0}^{n-2} \binom{n-2}{k} \psi^{(k)} \psi^{(n-k-2)} - \mu \xi^{(n-2)} - \lambda \xi^{(n-1)} \right] \right\}_{\tau'=0} \quad (59)$$

Z wzorów (52), (53), (54) i (55) wynika, że

$$\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = 0 \quad (60)$$

$$\beta_0 = \sqrt{\varphi_z} \quad (61)$$

Dalsze współczynniki α_n i β_n obliczymy przy pomocy wzorów (58) i (59). Przykładowo, dla $n = 5$ będzie:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \nu_0 - \beta_0 \\ \beta_2 &= -\frac{1}{2} \beta_1 \\ \beta_3 &= \frac{1}{6} \beta_1 \\ \beta_4 &= \frac{1}{24} (-\beta_1 + \frac{2}{\nu} \beta_0^2 \beta_1) \\ \beta_5 &= \frac{1}{120} (\beta_1 - \frac{4}{\nu} \beta_0^2 \beta_1 + \frac{10}{\nu} \beta_0 \beta_1^2 - \frac{2}{\nu^2} \beta_0^2 \beta_1) \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

oraz

$$\left. \begin{aligned} \alpha_3 &= \frac{1}{3\psi} \beta_0 \beta_1 \\ \alpha_4 &= \frac{1}{12\psi} (-\beta_0 \beta_1 + \beta_1^2 - \frac{\lambda}{\psi} \beta_0 \beta_1) \\ \alpha_5 &= \frac{1}{60\psi} [\beta_0 \beta_1 - 3\beta_1^2 - \frac{\lambda}{\psi} \beta_0 \beta_1 + \frac{\lambda}{\psi} \beta_0 \beta_1 - \frac{\lambda}{\psi} \beta_1^2 + (\frac{\lambda}{\psi})^2 \beta_0 \beta_1] \end{aligned} \right\} (63)$$

Znając funkcje $\xi(\tau')$ oraz $\psi(\tau')$ w postaci szeregów potęgowych (48) i (49) prąd w uzwojeniu wzbudzącym obliczymy zgodnie z zależnością (24):

$$i(\tau') = [1 - \xi(\tau')] \psi(\tau') \quad (64)$$

D. Zgodnie z (35) w przedziale III obowiązuje równanie:

$$\dot{\psi} = (1 - \xi_8) \psi + \frac{d\psi}{d\tau'} \quad (65)$$

Wynika stąd, że w przedziale III - podobnie jak w przedziale I - linowoje narastają wykładniczo, ale według zależności:

$$\psi(\tau') = \frac{\psi_0}{1 - \xi_8} [1 - e^{-(1 - \xi_8)\tau'}] + \psi_{ru} e^{-(1 - \xi_8)\tau'} \quad (66)$$

gdzie

$$\psi_{ru} = \left\{ \psi(\tau') \right\}_{\tau'=0} = \left\{ \psi(\tau') \right\}_{\tau'=\tau_{ru}} \quad (67)$$

Wartość funkcji $\psi(\tau')$ w stanie ustalonym wynosi:

$$\psi_0 = \left\{ \psi(\tau') \right\}_{\tau'=\infty} = \frac{\psi_0}{1 - \xi_8} \quad (68)$$

Prąd w uzwojeniu wzbudzącym obliczymy zgodnie z (24) i (35):

$$i(\tau') = (1 - \xi_8) \psi(\tau') \quad (69)$$

Oczywiście

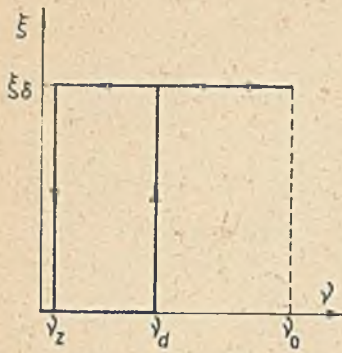
$$i_{ru} \left\{ i(\tau') \right\}_{\tau'=0} = (1 - \xi_8) \psi_{ru} \quad (70)$$

$$i_0 = \left\{ i(\tau') \right\}_{\tau'=\infty} = \psi_0 \quad (71)$$

E. Wyrażenia (33) i (34) dla przedziału I, (48) i (49) dla przedziału II oraz (35) i (66) dla przedziału III, uzupełnione wyrażeniami (44), (64) i (69), przedstawiają kompletne rozwiązania równań wyjściowych (22) i (23) w założonych warunkach, a tym samym opisują poszukiwane bezwymiarowe charakterystyki dynamiczne ME.

4. Przykłady bezwymiarowych charakterystyk dynamicznych ME

Chcemy wyznaczyć bezwymiarowe charakterystyki dynamiczne $\xi(\tau)$, $\psi(\tau)$ oraz $i(\tau)$ w następującym szczególnym przypadku: $\psi_0 = 1$, $\xi_8 = 0,9$, $\varphi_z = \text{const}$, $\psi = \text{const}$ oraz $\lambda = 0$, $\lambda = 0$. Wiadomo [3], że charakterystyka sta-



Rys. 3. Bezwymiarowa charakterystyka statyczna ME dla $\lambda = 0$

tyczna takiego przetwornika przyjmuje postać jak na rys. 3, gdzie - zgodnie z (31) - napięcie zadziałania $\nu_d = \sqrt{\varphi_z}$. Poszukiwane charakterystyki dynamiczne wyznaczać będziemy według wzorów wyprowadzonych w p. 3 zakładając, że w przedziale II rozwiązania równań wyjściowych w postaci szeregów potęgowych (48) i (49) są wystarczająco dokładne, gdy $n = 5$ oraz $\tau' < 1$. Zgodnie z (34) warunek $\tau' < 1$ oznacza, że obliczenia należy ograniczyć do przypadków dla których czas ruchu rdzenia

$$\tau_{ru} < 1 \quad (72)$$

Inaczej mówiąc: krzywa graniczna

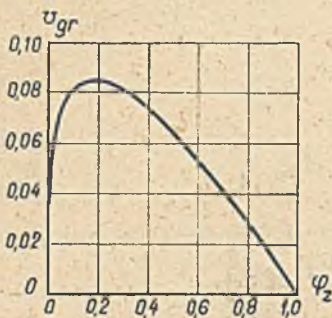
$$\xi_{gr}(\tau') = \left\{ \xi(\tau') \right\}_{\tau_{ru} = 1} \quad (73)$$

powinna przechodzić przez punkt $\tau' = \tau_{ru} = 1$ oraz $\xi(\tau') = \xi_8$. Podstawiając takie współrzędne do wzoru (48) otrzymujemy dla $n = 5$ wyrażenie następujące:

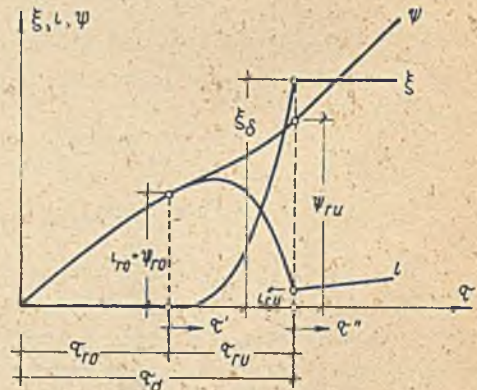
$$\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = \xi_8 \quad (74)$$

skąd, po uwzględnieniu (63) i podstawieniu $\lambda = 0$ i $\lambda = 0$

$$\nu_{gr} = \left\{ \nu \right\}_{\tau_{ru} = 1} = \frac{1}{30\xi_8} (\nu_0^2 + 6\beta_0\nu_0 - 7\beta_0^2) \quad (75)$$

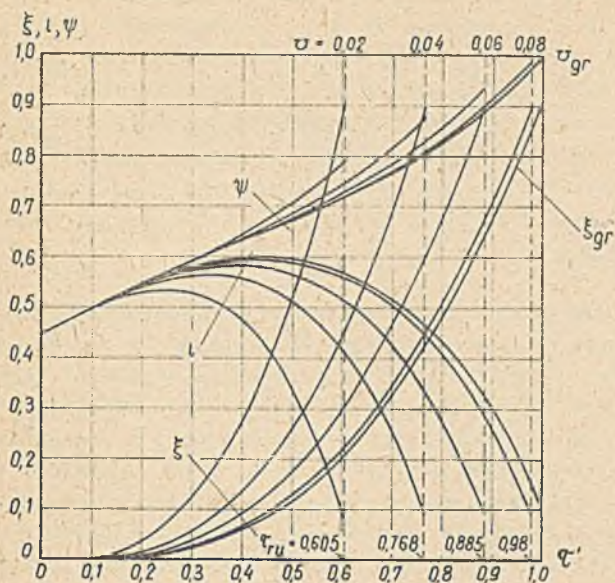


Rys. 4. Wykres zależności $\nu_{gr}(\varphi_z)$ dla $\nu_0 = 1$, $\xi_8 = 0,9$

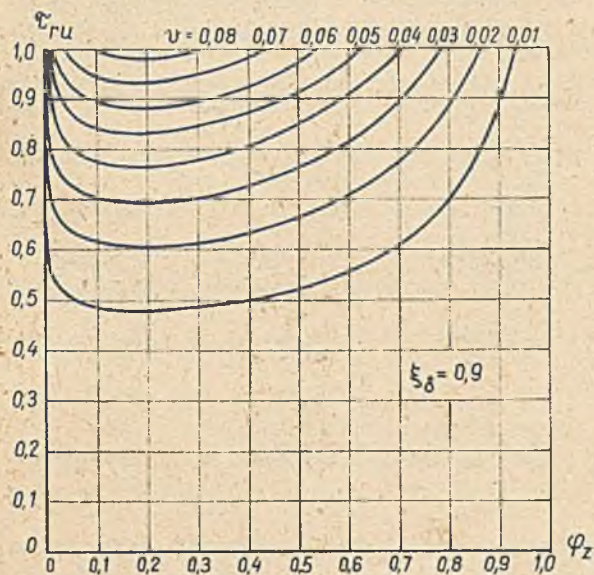


Rys. 5. Opis bezwymiarowych charakterystyk dynamicznych ME

Wykres zależności $\nu_{gr}(\varphi_z)$ dla $\nu_0 = 1$ i $\xi_8 = 0,9$ przedstawiono na rys. 4. Oczywiście, do obliczeń charakterystyk dynamicznych należy przyjmować $\nu < \nu_{gr}$.



Rys. 6. Przykłady bezwymiarowych charakterystyk dynamicznych ME dla $\nu_0 = 1$; $\xi_\delta = 0,9$; $\varphi_z = 0,2$ oraz $\nu < \nu_{gr}$ ($\nu_{gr} = 8,457 \cdot 10^{-2}$)



Rys. 7. Wykresy zależności $\tau_{ru}(\varphi_z, \nu)$ dla $\nu_0 = 1$, $\xi_\delta = 0,9$

Typowe przebiegi bezwymiarowych charakterystyk dynamicznych ME w przypadku $\lambda = 0$, $\lambda = 0$ pokazano na rys. 5. Przykładowe rodziny takich charakterystyk dla $\nu_0 = 1$; $f_{\Sigma} = 0,9$; $\varphi_z = 0,2$ oraz $\psi < \psi_{gr} = 8,457 \cdot 10^{-2}$ - dla uproszczenia tylko w przedziale II - przedstawiono na rys. 6. Wpływ φ_z na przebieg charakterystyk dynamicznych w omawianym przypadku ilustruje rys. 7, na którym pokazano wykresy zależności $\tau_{ru}(\varphi_z, \psi)$.

5. Uwagi końcowe

Równania bezwymiarowych charakterystyk dynamicznych ME, wyprowadzone w p.3, obowiązują - w ramach przyjętych założeń - w ogólnym przypadku pracy przekaźnikowej. Przeprowadzoną analizę można uogólnić na przypadek pracy proporcjonalnej [3], chociaż tu bardziej celowe wydaje się postępowanie polegające na linearyzacji równań wyjściowych i poszukiwaniu rozwiązań w postaci transmitancji operatorowych (por. w [2]). Metoda ta nie wyklucza rzecz jasna, możliwości wykorzystania wielkości względnych, przeciwnie: punktem wyjścia takiej analizy powinny być zlinearyzowane równania wyjściowe w postaci bezwymiarowej. W niniejszej publikacji zadanie to już się jednak nie mieści.

LITERATURA

- [1] BAJOREK Z.: Elektromaszynowe elementy automatyki. WNT, Warszawa 1969.
- [2] BORTLICZEK Z.: O właściwościach dynamicznych prostego mechanizmu elektromagnetycznego. ZNPSI "Automatyka" 1974, z. 25, str. 3-18.
- [3] BORTLICZEK Z.: O właściwościach statycznych jednonuzwojeniovych mechanizmów elektromagnetycznych prądu stałego. ZNPSI "Automatyka" 1979, z. 47, str. 3-13
- [4] BRONSZTEJN I.N., SIEMIENDIAJEW K.A.: Matematyka. Poradnik encyklopedyczny (tłum. z j. ros.). PWN, Warszawa 1968.
- [5] CZĘCZET J.S.: Mikromaszyny elektryczne w automatyce (tłum. z j. ros.). WNT, Warszawa 1968.
- [6] HARRIS M.R., LAWRENSON P.J., STEPHENSON I.M.: Per-unit systems with special reference to electrical machines. Cambridge 1970, University Press.
- [7] ГЕР-АКОПОВ А.К.: Динамика быстродействующих электромагнитов. Энергия, Москва 1965.

О БЕЗРАЗМЕРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ОДНООБМОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р е з ю м е

В работе представлен анализ динамических свойств однообмоточного электромагнитного механизма постоянного тока при использовании относительных величин. Выведены уравнения безразмерных динамических характеристик преобразователя. Даны примеры этих характеристик.

ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A D-C ONE-WINDING
ELECTROMAGNETIC DEVICES IN PER-UNIT FORM

S u m m a r y

In this paper the dynamic properties analysis in per-unit system of a d-c one-winding electromagnetic devices has been presented. The equations for the dynamic characteristics of a converter in per-unit form have been derived. The examples of such characteristics have been given.