ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 98 Elektryka z. 17 1964

ZYGMUNT KUCZEWSKI
Katedra Napędu Elektrycznego

CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO TRÓJFAZOWEGO PRZY REGULACJI PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ POPRZEZ WPROWADZENIE DODATKOWEGO NAPIĘCIA DO OBWODU WIRNIKA

Streszczenie. W pracy podano metodę analityczną wyznaczenia rodziny charakterystyk mechanicznych silnika asynchronicznego trójfazowego pierścieniowego przy regulacji prędkości obrotowej poprzez wprowadzenie do obwodu wirnika dodatkowego napięcia.

1. Wyprowadzenie ogólnych związków

Moment obrotowy rozwijany przez silnik asynchroniczny trójfazowy, przy zasilaniu trójfazowym symetrycznym napięciem można określić:

$$M = k_m \Phi_g I_2 \cos \psi$$

gdzie:

Φ_g - amplituda strumienia wirującego,

I_2 - prąd obwodu wirnika,

ψ - kąt fazowy pomiędzy prądem wirnika i napięciem indukowanym w uzwojeniu wirnika,

k_m - współczynnik stały.

Chcąc uzyskać liniową zależność pomiędzy składową prądu wirnika a momentem, należy tak przetransformować schemat zastępczy silnika, aby prąd magnesujący był niezależny od obciążenia.

Zakładamy

$$\hat{I}_{m1} = \frac{\hat{U}}{R_1 + jX_1} \tag{1}$$

gdzie:

$\hat{I}_{m1}$ - prąd magnesujący silnika,
$\hat{U}$ - napięcie sieci zasilającej,
R_1 - oporność czynna uzwojenia stojana,
X_1 - $X_{1\sigma} + X_{11}$
$X_{1\sigma}$ - reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana,
X_{11} - reaktancja strumienia głównego liczona po stronie stojana.

Straty w żelazie pomijamy.

SEM po stronie stojana można określić

$$\hat{E}_1 = j\,\hat{I}_{m1}\,X_{11} \tag{2}$$

Ponieważ siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu wtórnym: $\hat{E}_{20} = \hat{E}_1 \frac{Z_2}{Z_1}$, zależność (2) można napisać:

$$\hat{E}_{20} = j\,\hat{I}_{m1}\,X_{12} \tag{3}$$

$$X_{12} = X_{11}\frac{z_2}{z_1}$$

gdzie:

z_1, z_2 - liczba zwojów uzwojenia stojana i wirnika

Wprowadzając do równania (3) zależność (1) otrzymamy:

$$\hat{E}_{20} = j\,X_{12}\frac{\hat{U}}{R_1 + j\,X_1} \tag{4}$$

Dla stanu obciążenia silnika można zapisać równanie napięciowe

$$\hat{U} = \hat{I}_1 (R_1 + j X_{1\sigma}) + j \hat{I}_{m1} X_{11} \tag{5}$$

Z równania przepływów magnetycznych można otrzymać wyrażenie na prąd magnesujący:

$$\hat{I}_{m1} = \hat{I}_1 - \hat{I}_2 \frac{z_2}{z_1} \tag{6}$$

Wprowadzając ostatnią zależność do równania (5) otrzymamy:

$$\hat{U} = \hat{I}_1 (R_1 + j X_1) - j \hat{I}_2 X_{12} \tag{7}$$

Zależność (7) wprowadzając do równania (4):

$$\hat{E}_{20} = j \hat{I}_1 X_{12} + \hat{I}_2 \frac{X_{12}^2}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 - j X_1) \tag{8}$$

SEM $\hat{E}_{20}$, jak wyżej założono, jest niezależna od obciążenia. Wprowadzając współczynnik rozproszenia Blondela

$$B = 1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2}$$

równanie (8) przyjmie postać:

$$\hat{E}_{20} = j \hat{I}_1 X_{12} + \hat{I}_2 \frac{X_1 X_2 (1 - B)}{R_1^2 + X_1^2} (R_1 - j X_1)$$

Po przekształceniach:

$$\hat{E}_{20} = j\,\hat{I}_1 X_{12} - j\,\hat{I}_2 X_2 + \hat{I}_2 R_1 \frac{X_2}{X_1} \frac{1 - B}{1 + \frac{R_1^2}{X_1^2}} + j\hat{I}_2 X_2 \frac{B + \frac{R_1^2}{X_1^2}}{1 + \frac{R_1^2}{X_1^2}} \qquad (9)$$

Wprowadzając podstawienia do równania (9)

$$r_1 = R_1 \frac{X_2}{X_1} \frac{1 - B}{1 + \frac{R_1^2}{X_1^2}}$$

$$X_{12\sigma} = X_2 \frac{B + \frac{R_1^2}{X_1^2}}{1 + \frac{R_1^2}{X_1^2}}$$

otrzymamy:

$$\hat{E}_{20} = j\,\hat{I}_1 X_{12} - j\,\hat{I}_2 X_2 + \hat{I}_2 (r_1 + j\,X_{12\sigma}) \qquad (10)$$

Równanie (6) można zapisać:

$$j\,\hat{I}_{m1} X_{12} = j\,\hat{I}_1 X_{12} - j\,\hat{I}_2 X_{22} \qquad (11)$$

gdzie: $X_{22} = X_{12} \frac{z_2}{z_1}$ - reaktancja strumienia głównego liczona po stronie wirnika

Przy zwartym uzwojeniu wirnika:

$$j\,\hat{I}_{m1}\,X_{12} = \hat{I}_2\left(\frac{R_2}{s} + j\,X_{2\sigma}\right) \qquad (12)$$

gdzie:

R_2 - oporność czynna uzwojenia wirnika,

$X_{2\sigma}$ - reaktancja rozproszenia uzwojenia wirnika.

Przyrównując równania (11) i (12) otrzymamy:

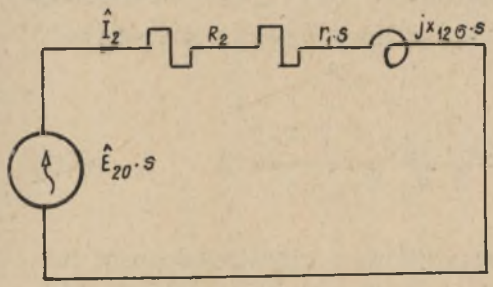
$$j\,\hat{I}_1 X_{12} - j\,\hat{I}_2 X_2 = \hat{I}_2\,\frac{R_2}{s} \qquad (13)$$

gdzie: $X_2 = X_{22} + X_{2\sigma}$,

s - poślizg silnika.

Wprowadzając zależność (13) do równania (10) i mnożąc obustronnie przez poślizg, równanie to przyjmie postać:

$$\hat{E}_{20}\,s = \hat{I}_2\,R_2 + \hat{I}_2\,(r_1 + j\,X_{12\sigma})\,s \qquad (14)$$



Rys.1

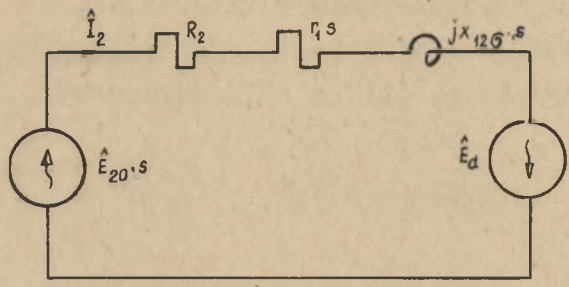
Równanie (14) jest równaniem napięciowym zwartego obwodu wirnika silnika asynchronicznego dla stałej, niezależnej od obciążenia SEM $\hat{E}_{20} \cdot s$

Równanie (14) można przedstawić wykreślnie (rys.1).

Do obwodu wirnika wprowadza się dodatkowe napięcie, które jest przesunięte o 180° w stosunku do napięcia E_{20}.

$$\hat{E}_d = - k \hat{E}_{20}$$

gdzie wartość "k" reprezentuje wielkość modułu dodatkowego napięcia $\hat{E}_d$. Schemat zastępczy silnika asynchronicznego dla tego przypadku przedstawiono na rys.2.



Rys.2

Na podstawie schematu na rys.2 można wyznaczyć prąd $\hat{I}_2$

$$\hat{I}_2 = \hat{E}_{20} \frac{s - k}{R_2 + (r_1 + j X_{12\sigma}) s} \tag{15}$$

$\hat{I}_2 = f(s)$ przedstawione zależnością (15) jest równaniem koła. Środek koła $\hat{I}_2 = f(s)$ określony będzie zależnością:

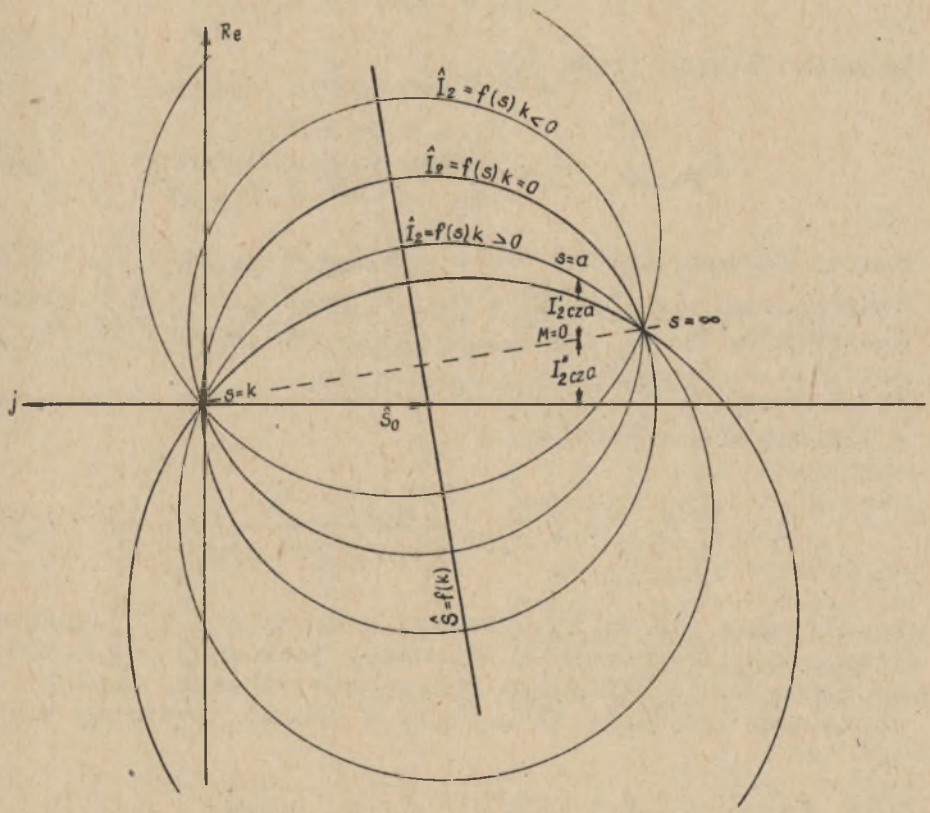
$$\hat{S} = - j \frac{\hat{E}_{20}}{2X_{12\sigma}} - \frac{\hat{E}_{20}(X_{12\sigma} + j r_1)}{2 R_2 X_{12\sigma}} k \tag{16}$$

Zmieniając moduł napięcia dodatkowego wprowadzonego do obwodu wirnika, tzn. zmieniając wartość "k" środki kół $\hat{I}_2 = f(s)$ przesuwają się po prostej $\hat{S} = f(k)$ określonej równaniem (16). Jeżeli do równania (15) podstawimy $s = \infty$, otrzymamy:

$$\hat{I}_{2(\infty)} = \frac{\hat{E}_{20}}{r_1 + j X_{12\sigma}} \tag{17}$$

Prąd $\hat{I}_{2(\infty)}$ jest niezależny od wielkości napięcia dodatkowego. Rodzina kół $\hat{I}_2 = f(s)$ dla różnych wartości "k" przechodzi przez wspólny punkt $\hat{I}_{2(\infty)}$.

Z równania (15) wynika, że $\hat{I}_2 = 0$ jeśli $s = k$. Drugim punktem wspólnym rodziny kół $\hat{I}_2 = f(s)$ dla różnych wartości "k" jest początek układu współrzędnych. Na rys.3 pokazana jest rodzina kół $\hat{I}_2 = f(s)$ dla różnych wartości "k".



Rys.3

2. Wyznaczanie charakterystyki mechanicznej

Równanie (15) można zapisać:

$$\hat{I}_2 = \hat{E}_{20} \frac{(s - k)(R_2 + r_1 s) - j X_{12\sigma} s (s - k)}{(R_2 + r_1 s)^2 + X_{12\sigma}^2 s^2} \tag{18}$$

Stąd składowa czynna prądu $\hat{I}_2$:

$$I_{2cz} = \hat{E}_{20} \frac{(s - k)(R_2 + r_1 s)}{(R_2 + r_1 s)^2 + X_{12\sigma}^2 s^2} \tag{19}$$

Składowa bierna prądu $\hat{I}_2$:

$$I_{2bind} = \hat{E}_{20} \frac{X_{12\sigma} s (s - k)}{(R_2 + r_1 s)^2 + X_{12\sigma}^2 s^2} \tag{20}$$

Prosta łącząca punkty dla $s = k$ i $s = \infty$, koła $\hat{I}_2 = f(s)$, jest prostą momentów ($M = 0$). Na podstawie rys.3 można stwierdzić, że $I_{2cz} = I'_{2cz} + I''_{2cz}$, zaś moment obrotowy $M = C\, I'_{2cz}$, gdzie C - wartość stała.

Z rys.3 można określić

$$M = C\, I'_{2cz} = C\, E_{20} \frac{R_2 (s - k)}{(R_2 + r_1 s)^2 + X_{12\sigma}^2 s^2} \tag{21}$$

Współrzędne punktu krytycznego krzywej $M = f(s)$ znajdujemy przez przyrównanie pierwszej pochodnej tej funkcji do zera. Po odpowiednich operacjach matematycznych otrzymamy wyrażenie na poślizg i moment krytyczny w funkcji "k"

$$s_{kr} = k + \sqrt{k^2 + R_2 \frac{R_2 + 2kr_1}{r_1^2 + X_{12\sigma}^2}} \tag{22}$$

dla k = (0)

$$s_{kr(0)} = \frac{R_2}{\sqrt{r_1^2 + X_{12\sigma}^2}}$$

$$M_{kr} = \frac{M_{kr(0)}}{\frac{1}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_{12\sigma}^2}} \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_{12\sigma}^2} \, \frac{s_{kr}}{s_{kr(0)}} \right]} \qquad (23)$$

gdzie:

$M_{kr(o)}$ - moment krytyczny dla k = 0,

$$M_{kr(o)} = \frac{CE_{20}}{2(r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_{12\sigma}^2})}$$

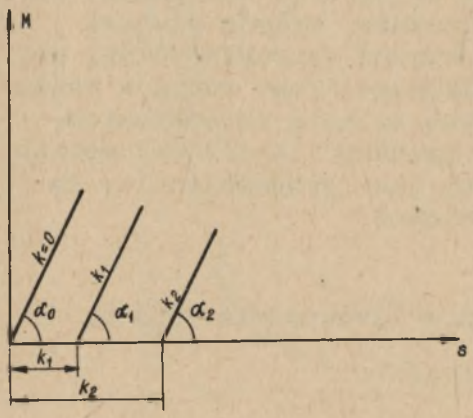
C - stała liczbowa.

Z równania (21) wynika, że przy s = k moment rozwijany przez silnik M = 0. Stąd wniosek, że w układzie współrzędnych M = f(s), charakterystyka przecina oś odciętych w punkcie s = k (rys.4). Prędkość obrotową przy s = k nazwiemy n_o.

Nachylenie "prostoliniowej" części charakterystyki mechanicznej silnika asynchronicznego można określić ze związku

$$tg\,\alpha = \frac{2\,M_{kr}}{M_n(s_{kr} - k)} \qquad (24)$$

gdzie M_n - moment znamionowy



Rys.4

Wprowadzając $\operatorname{tg} \alpha_{(o)} = \frac{2\, M_{kr(o)}}{M_n\, s_{kr(o)}}$ dla $k = 0$, oraz zależność (22) i (23) do równania (24) otrzymamy:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_{(o)} \frac{M_{kr}}{M_{kr(o)} \frac{s_{kr}-k}{s_{kr}(o)}} \tag{25}$$

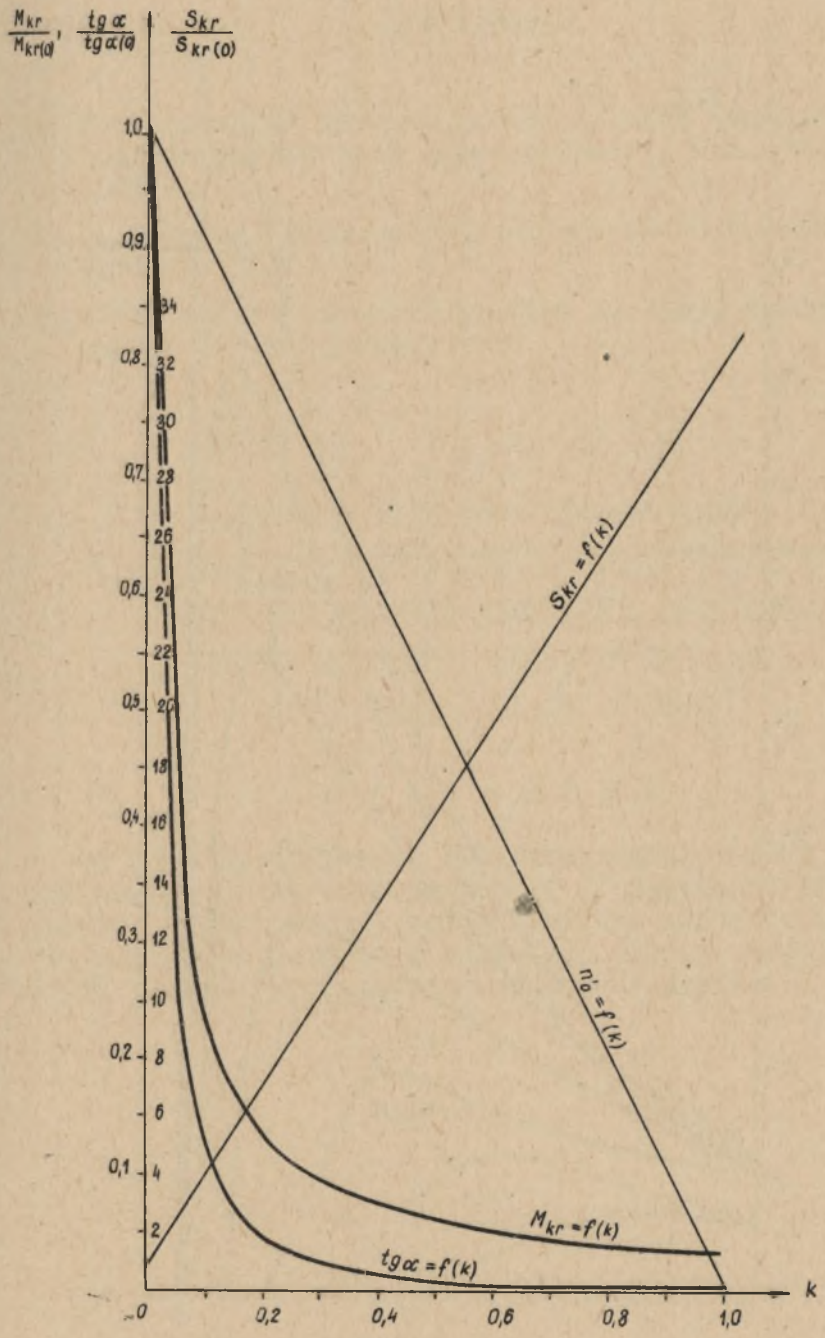
Na rys.5 podane są zależności $s_{kr} = f(k)$, $n'_o = f(k)$ $M_{kr} = f(k)$ oraz $\operatorname{tg} \alpha = f(k)$.

Na podstawie równań (21), (22), (23) oraz (25), można wykreślić rodzinę charakterystyk mechanicznych $M = f(n)$ silnika asynchronicznego trójfazowego pierścieniowego dla różnych wielkości dodatkowego napięcia $\hat{E}_d = - k\, \hat{E}_{20}$ wprowadzonego do obwodu wirnika. Rodzina charakterystyk $M = f(n,k)$ przedstawiona jest na rys.6.

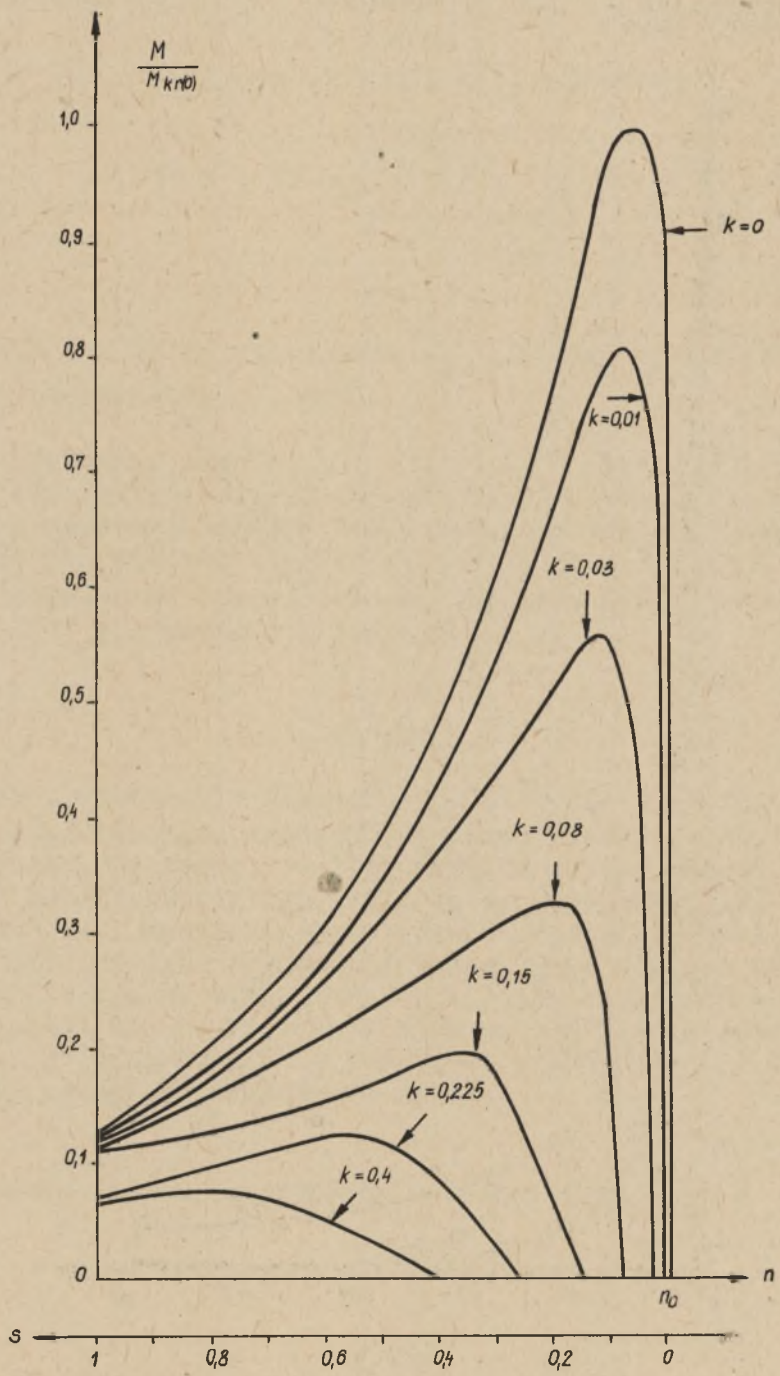
3. Wnioski

Przy powiększaniu wielkości dodatkowego napięcia $\hat{E}_d$ w obwodzie wirnika, prędkość n'_o proporcjonalnie maleje, prawie liniowo rośnie poślizg krytyczny, zaś moment krytyczny maleje prawie hiperbolicznie, maleje również stromość tzw. prostoliniowej części charakterystyki mechanicznej silnika asynchronicznego. Tego rodzaju rodzina charakterystyk mechanicznych silnika asynchronicznego nadaje się do regulacji prędkości obrotowej mechanizmów, których moment oporowy jest proporcjonalny do drugiej potęgi prędkości obrotowej.

Rękopis złożono w redakcji w listopadzie 1963 r.


Mkr/Mkr(0), tg α/tg α(0), Skr/Skr(0)
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
34
32
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
Skr = f(k)
n'o = f(k)
Mkr = f(k)
tg α = f(k)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
k

Rys.5


M / M_k(n0)
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
k=0
k=0,01
k=0,03
k=0,08
k=0,15
k=0,225
k=0,4
n
n0
s
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0

Rys.6

LITERATURA

[1] Z. Kuczewski: Analiza układu silnika asynchronicznego z przetwornicą częstotliwości. Praca doktorska 1961 r.

[2] L. Dreyfus: Kommutatorkaskaden und Phasenschieber. Springer 1931.

[3] M. Kostienko: Elektriczeskije masziny. Specjalnaja czast. Gosenergoizdat 1949.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ РЕГУЛИРОВКЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПЬ РОТОРА

Содержание

В статье приведен аналитический метод определения группы механических характеристик кольцевого трехфазного асинхронного двигателя при регулировке скорости вращения путем ввода в цепь ротора дополнительного напряжения.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ À BAGUES AVEC RÉGLAGE DE LA VITESSE PAR INTRODUCTION DE LA TENSION SUPPLÉMENTAIRE DANS LE CIRCUIT DU ROTOR

R é s u m é

Dans ce rapport on a présenté la méthods analytique permettant de determiner de groupe de caractéristiques mecaniques, du moteur asynchrone triphase a bagues en réglage de la vitesse, par l' introduction de la tension supplementaire dans le circuit du rotor.