ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1970

Seria: ELEKTRYKA z. 27 Nr kol. 274

KRZYSZTOF KRYKOWSKI

Katedra Elektrotechniki Przemysłowej

CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO STEROWANEGO CZĘSTOTLIWOŚCIOWO

Streszczenie. Artykuł zawiera krótkie omówienie charakterystyk mechanicznych silnika asynchronicznego klatkowego sterowanego częstotliwościowo, zwraca uwagę na wpływ temperatury uzwojeń na charakterystyki mechaniczne oraz podaje zalecenia odnośnie korekcji amplitudy napięcia zasilającego.

1. Ogólne zależności analityczne opisujące charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego przy sterowaniu częstotliwościowym

Charakterystykę mechaniczną silnika asynchronicznego najłatwiej określić posługując się wzorem Klossa w postaci pełnej

$$M = \frac{2\,M_k(1 + \varepsilon s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon s_k} \tag{1}$$

lub uproszczonej

$$M = \frac{2\,M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \tag{2}$$

Wielkość momentu i poślizgu krytycznego określają zależności:

$$M_k = K \frac{U_{1f}^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \tag{3}$$

$$S_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \tag{4}$$

gdzie:

$K = \frac{m\,p}{2\pi f_{1n}}$ p - liczba par biegunów silnika

$\varepsilon \approx \frac{R_1}{R_2'}$

Rozpatrując własności silnika asynchronicznego przy częstotliwościach napięcia zasilającego różnych od znamionowej wygodnie jest wprowadzić następujące wielkości

$\alpha = \frac{f_1}{f_{1n}}$ - względna częstotliwość napięcia zasilającego obwód stojana

$\beta = \frac{f_2}{f_{1n}}$ - poślizg absolutny silnika

$\gamma = \frac{U_1}{U_{1n}}$ - względne napięcie uzwojenia stojana

$\xi = \frac{\gamma}{\alpha}$ - współczynnik korekcji amplitudy napięcia uzwojenia stojana

$\mu = \frac{M_k}{M_{kn}}$ - względny moment krytyczny przy $\xi = 1$

Wzór Klossa można będzie wówczas zapisać w postaci

$$M = \frac{2\, M_k (1 + \varepsilon \frac{\beta_k}{\alpha})}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta} + 2\varepsilon \frac{\beta_k}{\beta}} \tag{5}$$

lub

$$\frac{M}{M_n} = p_M \mu\, \xi^2 \frac{2(1 + \varepsilon \frac{\beta_k}{\alpha})}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta} + 2\varepsilon \frac{\beta_k}{\alpha}} \tag{5a}$$

Wartości M_k i β_k wyniosą odpowiednio

$$M_k = \xi^2 \mu\, M_{kn} \tag{6}$$

$$\beta_k = s_{kn} \alpha \sqrt{\frac{1 + \tau^2}{1 + \alpha^2 \tau^2}} \tag{7}$$

gdzie

$$\tau = \frac{X_k}{R_1} \text{ dla } f_{1n}$$

zaś

$$\mu = \frac{1 + \sqrt{1 + \tau^2}}{1 + \sqrt{1 + \alpha^2 \tau^2}} \tag{8}$$

Wartość τ można obliczyć (znając oporności fazy stojana i parametry katalogowe silnika) posługując się zależnością (3). Dla częstotliwości przemysłowej można na ogół przyjąć $R_1^2 \ll X_k^2$ czyli

$$M_{kn} = K \frac{U_{1fn}^2}{R_1 + X_k}$$

stąd

$$\tau = \frac{K\, U_{1fn}^2}{R_1\, M_n\, p_{Mn}} - 1 \tag{9}$$

2. Korekcja napięcia stojana

Na rys. 1 zostały przedstawione charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego klatkowego typu SZJd o parametrach znamionowych: $P_n = 4,5$ kW; $U_n = 380$V; $I_n = 9,3$ A dla $n_n = 1440 \frac{obr}{min}$, $\frac{M_m}{M_n} = 2$; $R_{1f} = 4,90 \approx R_2'$ dla temperatury uzwojeń $\vartheta_{uz} = 100^oC$.

Charakterystyki zostały wykreślone dla kilku różnych częstotliwości napięcia stojana przy założeniu zmian amplitudy napięcia zgodnie z zależnością $\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1n}}{f_{1n}} = const$ lub w jednostkach względnych $\gamma = \alpha$. Taki sposób zmiany amplitudy napięcia stojana w funkcji częstotliwości powinien zapewnić w przybliżeniu stały strumień magnetyczny w szczelinie powietrznej oraz moment krytyczny bliski znamionowemu. Wpływ rezystancji uzwojeń stojana powoduje, że założone cele zostają osiągnięte tylko dla częstotliwości bliskich znamionowej lub wyższych. Powoduje to konieczność stosowania dodatkowego współczynnika korekcji amplitudy napięcia stojana. Dobór współczynnika korekcji ξ należy przeprowadzić tak, by zapewnić odpowiednio dużą przeciążalność momentem oraz pracę silnika z możliwie dużą sprawnością.

Jak wiadomo przy pewnych pomocniczych założeniach można udowodnić, że optymalną wartość napięcia stojana uzyskuje się wtedy, gdy jest spełniona zależność

$$\frac{E}{E_n} = \alpha\sqrt{\frac{M_m}{M_n}} \tag{10}$$

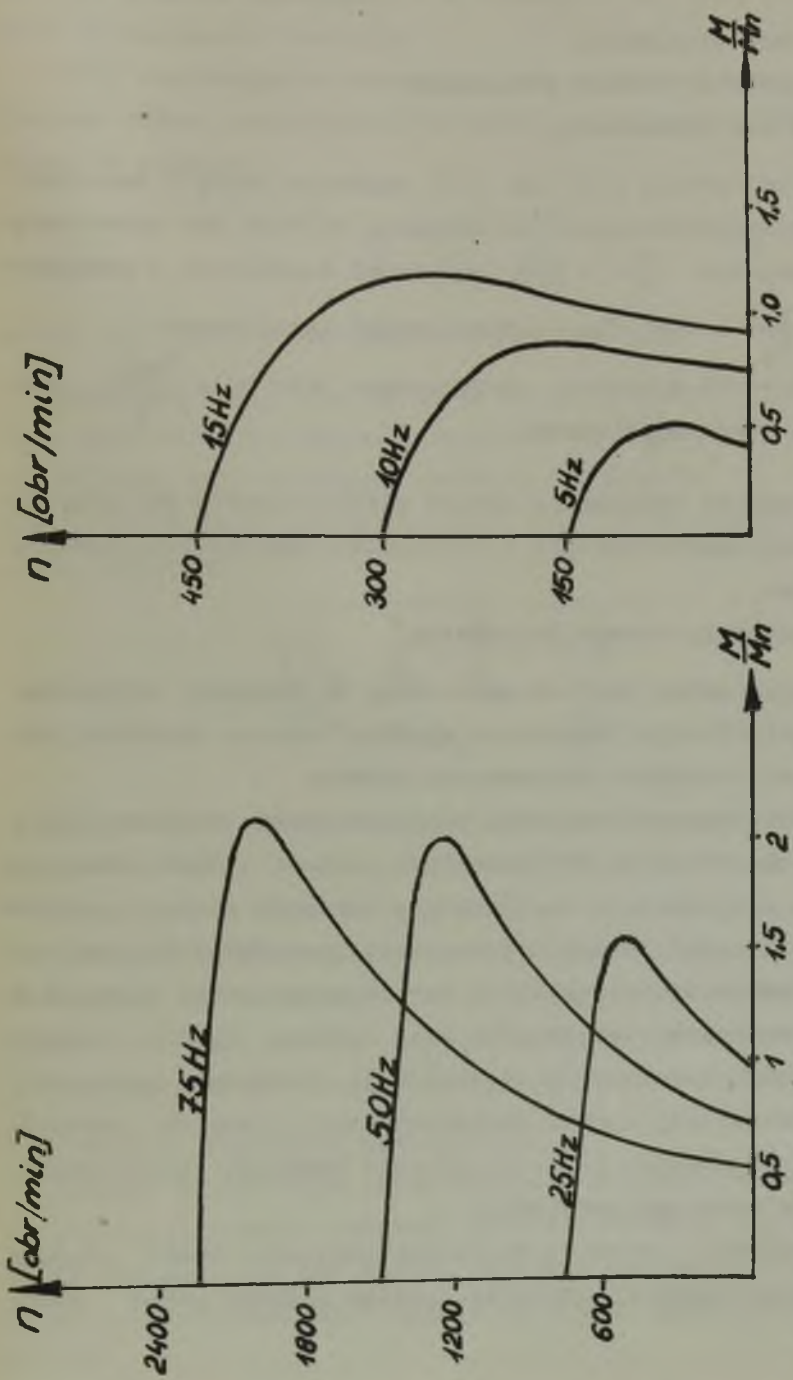
lub jej równoważna

$$\beta = s_n \tag{11}$$

gdzie

E - SEM fazowa stojana

E_n - SEM fazowa stojana dla warunków znamionowych



Rys. 1. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego przy różnych częstotliwościach napięcia zasilającego dla warunku $\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1n}}{f_{1n}}$

M_m - moment obciążenia

M_n - znamionowy moment obciążenia

s_n - poślizg znamionowy

Zachowanie warunku (10) lub (11) zapewnia pracę z maksymalną dla danej częstotliwości sprawnością silnika zaś charakterystyki mechaniczne $\frac{M}{M_m} = f(\beta)$ są niemal identyczne z charakterystykami $\frac{M}{M_n} = f(\beta)$ dla częstotliwości znamionowej.

Przeciążalność momentem, zdefiniowana jako $p_M = \frac{M_{max}}{M_m}$, jest praktycznie równa znamionowej

M_{max} - oznacza maksymalny moment elektromagnetyczny przy danej częstotliwości i zachowaniu warunku (10) lub (11) zaś

M_m - założony moment obciążenia

Moment maksymalny jest na ogół różny od momentu krytycznego. Dla częstotliwości niskich - większy (nieraz wyraźnie), dla częstotliwości wysokich nieznacznie niższy.

Dobór współczynnika korekcji napięcia obwodu stojana tak, by było spełnione równanie (10) lub (11) posiada jednak pewne niedogodności, a mianowicie współczynnik korekcji stojana jest funkcją dwóch zmiennych. Drugą istotną wadą jest fakt, że przy niskich częstotliwościach napięcia zasilającego nawet niewielkie lecz gwałtowne zmiany obciążenia (tak szybkie, by nie zdążył zadziałać układ regulacji napięcia) mogą spowodować pracę silnika na niestabilnej części charakterystyki. Wady te powodują konieczność stosowania dla tego rodzaju korekcji skomplikowanych układów sprzężeń zwrotnych.

Chcąc uzależnić korekcję amplitudy napięcia obwodu stojana tylko od częstotliwości napięcia, należy założyć pewną stałą

wartość momentu obciążenia i w oparciu o założone kryterium dobrać współczynnik korekcji.

Dobór współczynnika korekcji przy założonym momencie krytycznym można przeprowadzić w oparciu o zależność (6) sprowadzoną do postaci

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{\mu} \frac{M_k}{M_{kn}}} \tag{12}$$

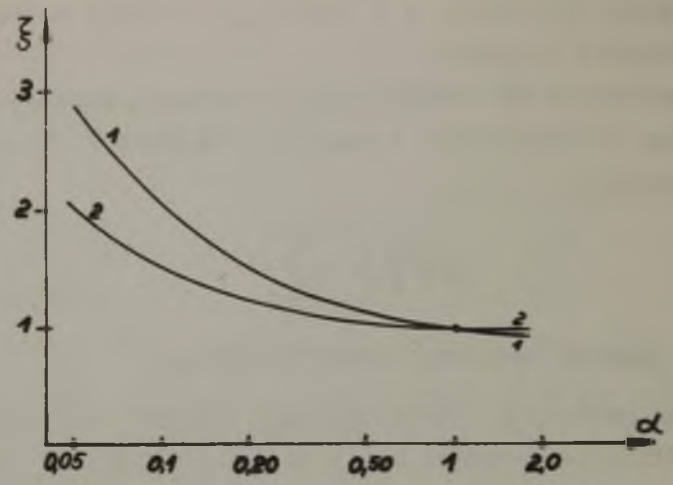
gdzie M_k oznacza założony moment krytyczny.

Potrzebną wartość μ można obliczyć z wzorów (8) i (9). Doboru współczynnika korekcji napięcia dla maksymalnej sprawności silnika przy założonym momencie obciążenia M_m można dokonać wychodząc z zależności (5a) i (11). Po prostym przekształceniu otrzymamy

$$\xi = \sqrt{\frac{M_m}{M_n} \frac{\frac{s_n}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{s_n} + 2\varepsilon \frac{\beta_k}{\alpha}}{2\mu p_M (1 + \varepsilon \frac{\beta_k}{\alpha})}} \tag{13}$$

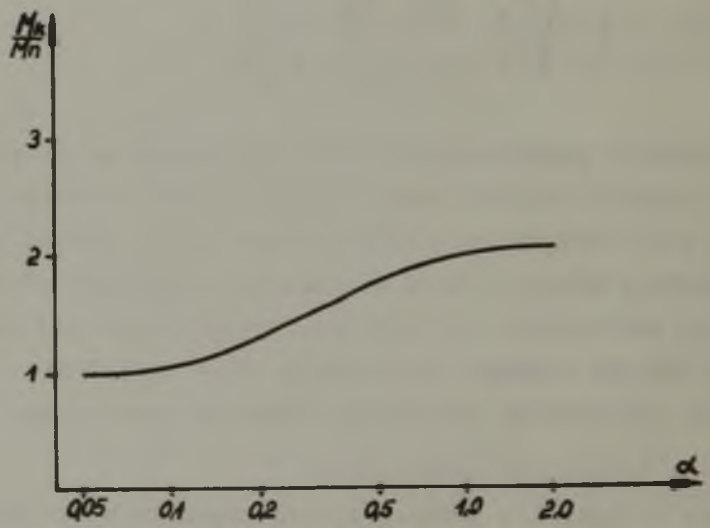
Na rysunku 2 przedstawiono dobór współczynnika korekcji napięcia w funkcji częstotliwości względnej dla badanego silnika o mocy 4,5 kW. Krzywa 1 ilustruje dobór współczynnika korekcji przy załączeniu pracy silnika z momentem krytycznym równym znamionowemu, zaś krzywa 2 - taki dobór współczynnika ξ by dla momentu obciążenia równego znamionowemu było spełniona równość $\frac{E}{E_n} = \alpha$, co powinno dla obciążenia momentem znamionowym zapewnić pracę z maksymalną sprawnością.

Rysunek 3 ilustruje przeciążalność momentem badanego silnika przy zastosowaniu korekcji zgodnie z krzywą 2 z rysunku 2. Można zauważyć, że ten sposób korekcji nie zapewnia przy niskich częstotliwościach odpowiednio dużej przeciążalności momentem.



Rys.2. Współczynnik korekcji napięcia stojana przy sterowaniu częstotliwościowym silnika asynchronicznego

1 - przy zachowaniu znamionowego momentu krytycznego, 2 - przy zachowaniu warunku $\frac{E}{E_n} = \alpha$ dla $M = M_n$



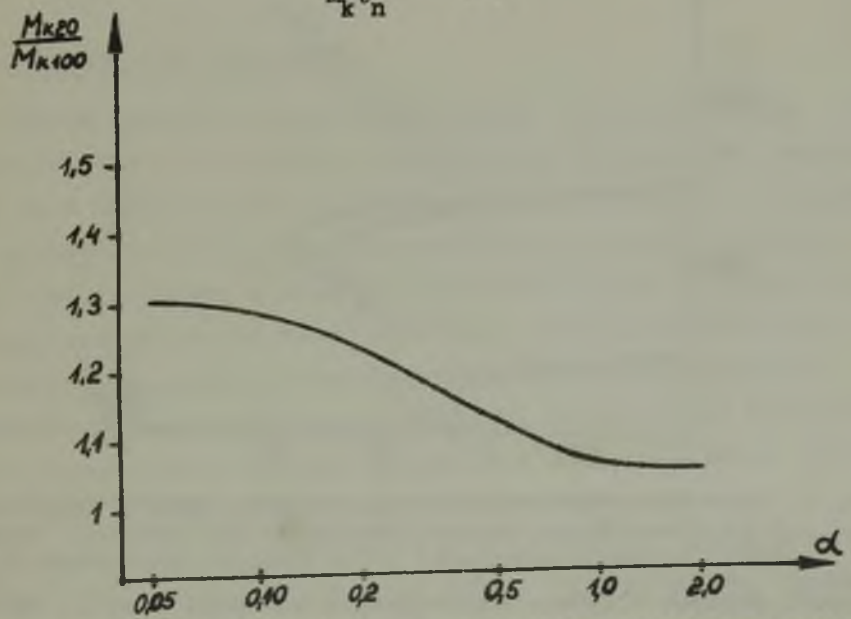
Rys. 3. Przeciążalność momentu silnika asynchronicznego sterowanego częstotliwościowo przy doborze współczynnika korekcji napięcia stojana tak by była spełniona zależność $\frac{E}{E_n} = \alpha$ dla $M = M_n$

3. Wpływ temperatury uzwojeń na charakterystyki mechaniczne silnika

Jak widać z przeprowadzonych poprzednio rozważań charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego są w dużym stopniu uzależnione od oporności uzwojeń. Wzrost temperatury uzwojeń powoduje wzrost oporności czynnej, a co za tym idzie zmniejszenie się momentu krytycznego, zwiększenie się poślizgu krytycznego oraz konieczność stosowania większych wartości współczynnika korekcji.

Na rysunku 4 została podana zmiana momentu krytycznego badanego silnika asynchronicznego przy temperaturze uzwojeń równej $\vartheta_o = 20^oC$. Zmiana ta została przedstawiona w funkcji częstotliwości względnej jako

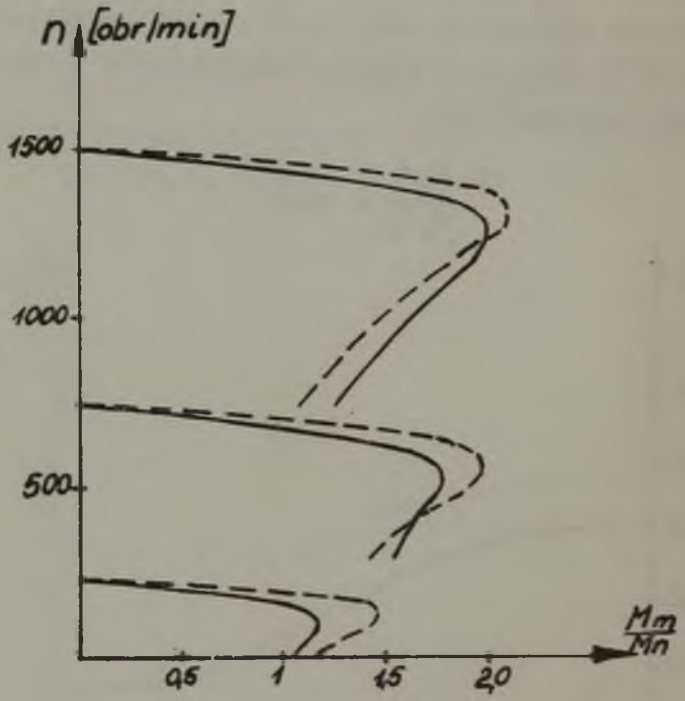
$$\frac{M_k \vartheta_o}{M_k \vartheta_n} = f(\alpha)$$



Rys. 4. Zmiana momentu krytycznego przy temperaturze pracy uzwojeń niższej od znamionowej $\vartheta_{o\,uzw} = 20^oC$ podczas gdy $\vartheta_{n\,uz} = 100^oC$

Z wykresu widać, że wpływ temperatury na przeciążalność silnika przy częstotliwościach wyższych od znamionowej jest nieznaczna, a przy niższych wyraźna.

Na rysunku 5 zostały podane charakterystyki mechaniczne badanego silnika dla częstotliwości napięcia zasilającego 50 Hz, 25 Hz i 7,5 Hz. Współczynnik korekcji został dobrany tak, by dla znamionowego obciążenia przy znamionowej temperaturze pracy uzwojeń zachodziło $\frac{E}{E_n} = \alpha$ (zgodnie z krzywą 2 na rysunku 2).



Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego o mocy 4,5 kW sterowanego częstotliwościowo dla uzwojeń zimnych $\vartheta_{uz} = 20^{\circ}C$ (krzywa przerywana) i dla uzwojeń nagrzanych $\vartheta_{uz} = 100^{\circ}C$ (krzywa ciągła). Współczynnik korekcji został dobrany tak, by dla $M = M_n$ była spełniona zależność $\frac{E}{E_n} = \alpha$

Krzywe ciągłe wyznaczają teoretyczne charakterystyki mechaniczne silnika dla znamionowej temperatury pracy uzwojeń, krzywe przerywane dla założonej temperatury $\vartheta_o = 20^oC$.

Większość zdjętych doświadczalnie punktów charakterystyki mechanicznej mieści się w obszarze pomiędzy charakterystykami mechanicznymi dla $\vartheta_{uz} = 20^oC$ (temperatura otoczenia) a $\vartheta_n = 100^oC$ (znamionowa temperatura uzwojeń), czyli mimo pogorszonych warunków chłodzenia ze względu na krótki czas pomiaru silnik nie zdążył się jeszcze nagrzać do temperatury znamionowej.

Z przytoczonych zależności wynika, że silnik przy temperaturze uzwojeń silnika niższej od znamionowej posiada korzystniejsze charakterystyki mechaniczne niż w przypadku znamionowej temperatury uzwojeń, niedopuszczalną jest natomiast zarówno ze względu na wytrzymałość cieplną izolacji jak i na charakterystyki mechaniczne silnika praca przy temperaturze uzwojeń wyższej od znamionowej.

4. Podsumowanie i wnioski

Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego przy częstotliwościach napięcia zasilającego niższych od znamionowej są w dużym stopniu uzależnione od rezystancji i temperatury uzwojeń silnika. Przy ich wzroście występuje obniżenie momentu krytycznego, w związku z czym do regulacji częstotliwościowej zaleca się stosować silniki o dużej przeciążalności momentem. Przy częstotliwościach napięcia stojana wyższych od znamionowej zależność charakterystyki mechanicznej od rezystancji i temperatury uzwojeń występuje w małym stopniu i nie ma istotnego wpływu na przebieg charakterystyk.

W zależności od stosowanych częstotliwości napięcia stojana można podać zalecenia odnośnie doboru współczynnika korekcji zdefiniowanego jako $\xi = \frac{\gamma}{\alpha} = \frac{U_1}{f_1} \frac{f_{1n}}{U_{1n}}$.

W układach w których dysponujemy sprzężeniem zwrotnym, któreby zapewniło regulację napięcia stojana zgodnie z wymogami równania (10) lub (11) nawet w przypadku najbardziej niekorzystnych zmian momentu obciążenia celową jest regulacja współczynnika korekcji w sposób ciągły taka by była spełniona zależność

$$\frac{E}{E_n} = \alpha \sqrt{\frac{M_m}{M_n}}$$

Gdy nie dysponujemy odpowiednim sprzężeniem zwrotnym i konieczne jest uzależnienie współczynnika korekcji tylko od częstotliwości można wyróżnić trzy zakresy regulacji napięcia.

Dla częstotliwości wyższych od znamionowej ze względu na znikomy wpływ rezystancji uzwojeń, najwygodniej jest przyjąć współczynnik korekcji $\xi = 1$ czyli zmieniać napięcie stojana zgodnie z zależnością

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1n}}{f_{1n}} = \text{const}$$

Dla częstotliwości nieznacznie niższych od znamionowej najwygodniej jest założyć stały moment obciążenia równy np. momentowi znamionowemu i w oparciu o to założenie dobrać współczynnik korekcji zgodnie z zależnością (13). Należy jednak wtedy sprawdzić czy tak dobrany współczynnik korekcji zapewnia odpowiednio duży moment krytyczny.

Dla częstotliwości napięcia stojana znacznie niższych od znamionowej dobór współczynnika korekcji w oparciu o równanie (13) nie zapewnia odpowiednio dużego momentu krytycznego, zresztą zależności (10) i (11) z powodu zmniejszenia się strat w stali nie zapewniają już pracy z maksymalną dla danej częstotliwości sprawnością. Najwygodniej jest wtedy dobrać współczynnik korekcji tak, by zapewnić odpowiednio duży moment krytyczny (zależ-

ność 12). Oprócz tego należy zwrócić uwagę na to, by nie przekroczyć maksymalnej dozwolonej temperatury uzwojeń, co ze względu na pogorszenie warunki chłodzenia może nastąpić nawet dla prądów mniejszych od znamionowego.

LITERATURA

[1] Andriejew W.P., Sabinin J.A.: Podstawy napędu elektrycznego Wyd. Nauk. Techn. Warszawa 1966.

[2] Manitius J., Bisztyga K., Grzybowski W., Kardaszewicz J.: Hutnicze napędy elektryczne - Katowice 1969.

[3] Chamudchanow M.Z., Usmanow S.Z., Usmanchodzajew N.M., Chasanow M.A.: Czastotnoe regulirowanie skorosti elektropriwodow pieriemiennogo toka s awtomaticzeskim uprawlenijem otwientilnych prieobrazowatielej. Taszkient 1966.

[4] Szczedrowicz W.A.: Zakony i priedieły czastotnogo uprawlenija asinchronnymi dwigatielami w sootwietstwii s ich paramietrami i charaktienstikoj raboczego miechanizma - Elektropriwod i sistiemy uprawlenija - Izdatielstwo "Nauka" Moskwa - Leningrad 1966.

[5] Loocke G.: Probleme der Spannungsanpassung beim Betrieb von Asynchronmotoren mit variabler Frequenz AEG-Mitt Nr 1/2 1964.

[6] Heumann K., Jordan K.G.: Das Verhalten des Käfigläufermotors bei veränlicher Speisefrequenz und Stomregelung AEG-Mitt Nr 1/2 1964.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Р е з ю м е

Статья содержит короткое описание механических характеристик асинхронного клеточного двигателя с частотной регулировкой, обращает внимание на влияние температуры обмоток на механические характеристики, а также приводит рекомендации по корректировке амплитуды питающего напряжения.

THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF INDUCTION MOTOR FREQUENTLY CONTROLLED

S u m m a r y

The article includes a short discussion of mechanical characteristics of induction motor frequently controlled. It stresses the indluence of temperature in the mechanical characteristics, and gives recommendations to the correction of supply voltage amplitude.