

KAZIMIERZ GIERLOTKA
ROMAN NOWAK

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki

BADANIE ASYNCHRONICZNEGO SILNIKA KLATKOWEGO
ZASILANEGO Z PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. W pracy krótko omówiono częstotliwościowe sterowanie prędkości silników asynchronicznych. Następnie podano niektóre wyniki pomiarów silnika asynchronicznego zasilanego z tyrystorowego przemiennika częstotliwości. Przeprowadzono porównanie charakterystyk silnika asynchronicznego zasilanego z tyrystorowego przemiennika częstotliwości i z wirującej przetwornicy częstotliwości.

1. Sterowanie częstotliwościowe silnika asynchronicznego

Rozpatrując zależności zachodzące w silniku asynchronicznym przy sterowaniu częstotliwościowym jego prędkości obrotowej wygodnie posługiwać się jednostkami względnymi, odniesionymi do znamionowych wartości napięcia i częstotliwości.

$$\frac{U}{U_n} = f \quad \frac{f_1}{f_{1n}} = \alpha$$

$$\frac{U/f_1}{U_n/f_{1n}} = \frac{f}{\alpha} = \delta - \text{współczynnik korekcyjny amplitudy napięcia stojana.}$$

Moment obrotowy silnika asynchronicznego zasilanego napięciem sinusoidalnym o częstotliwości różnej od znamionowej można przedstawić za pomocą wzoru Klossa

$$M = \frac{2M_k \left(1 + \varepsilon \frac{A_k}{\alpha}\right)}{\frac{A_k}{\beta} + \frac{\beta}{A_k} + 2\varepsilon \frac{A_k}{\alpha}} \quad (1)$$

gdzie

$$\beta_k = \alpha s_k \sqrt{\frac{1 + \varepsilon^2}{1 + \alpha^2 \varepsilon^2}} - \text{pośląg krytyczny} \quad (2)$$

s_k - poślizg krytyczny dla $f_1 = f_{1n}$

$$\varepsilon = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\tau = \frac{1}{\varepsilon s_k}$$

Wartość momentu krytycznego określa zależność

$$M_k = \frac{m p}{2 \pi \alpha f_{1n}} \frac{(\frac{1}{2} U_n)^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \alpha^2 (X_1 + X_2')^2}} \quad (3)$$

Dla dużych częstotliwości napięcia zasilającego (α bliskie jedności) można w wyrażeniu (3) pominąć rezystancję stojana R_1 .

Dla zachowania znamionowej wartości momentu krytycznego silnika należy utrzymywać znamionową wartość stosunku napięcia do częstotliwości

$$\frac{U}{f_1} = \frac{U_n}{f_{1n}} \quad \text{czyli} \quad \delta = 1.$$

Przy niskich częstotliwościach napięcia zasilającego rezystancja R_1 jest porównywalna z sumą reaktancji rozproszenia $\alpha(X_1 + X_2')$. Należy wtedy zwiększyć wartość współczynnika korekcji amplitudy napięcia stojana δ , aby silnik zachował żądaną przeciążalność momentem.

Znane są wyrażenia [5] na korekcję współczynnika δ dla zachowania znamionowej wartości momentu krytycznego

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\mu}} \quad (4)$$

oraz dla zachowania znamionowego spadku prędkości obrotowej silnika Δn_n przy obciążeniu znamionowym

$$\delta = \sqrt{\frac{\frac{s_n}{s_k} + \frac{A_k}{s_n} + 2\varepsilon \frac{A_k}{\alpha}}{2 \mu P_M (1 + \frac{A_k}{\alpha})}} \quad (5)$$

gdzie

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

$$\mu = \frac{1 + \sqrt{1 + \tau^2}}{1 + \sqrt{1 + \alpha^2 \tau^2}} \quad (6)$$

Powyższe zależności są słuszne dla silnika asynchronicznego zasilanego napięciem sinusoidalnym. Przy zasilaniu silnika z tyrystorowego przemiennika częstotliwości przebieg napięcia znacznie różni się od sinusoidy i w grę wchodzi czynnik trudny do ujęcia analitycznego.

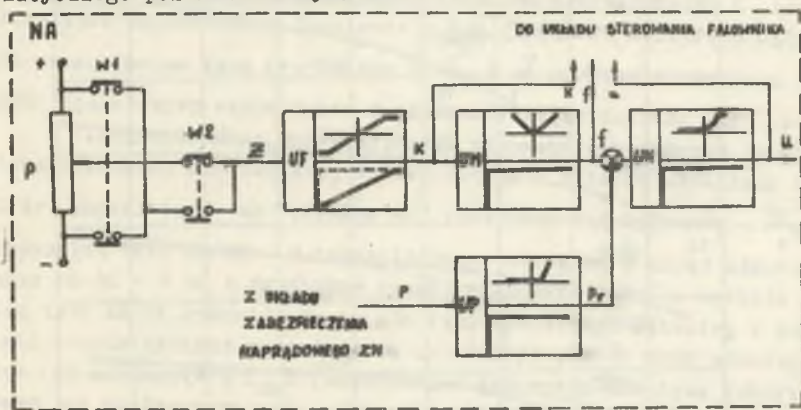
Przeprowadzono badania doświadczalne dla określenia wpływu odkształconego napięcia zasilającego na silnik asynchroniczny.

2. Opis badanego układu

Przedmiotem badań był asynchroniczny silnik klatkowy typu SZJDe 36b, 2,2 kW, 220/380 V, 9,4/5 A, 920 obr/min, 50 Hz, $\eta_n = 80,5\%$, $\cos\phi_n = 0,78$. Pomiarów charakterystyk mechanicznych silnika wykonano:

- przy zasilaniu silnika z generatora synchronicznego napięciem sinusoidalnym o zmiennej częstotliwości i amplitudzie,
- przy zasilaniu silnika z modelowego tyrystorowego przemiennika częstotliwości przedstawionego w pracy [2].

Tyrystorowy przemiennik częstotliwości został zbudowany w oparciu o falownik z sinusoidalną modulacją szerokości impulsów. Częstotliwość i amplitudę napięcia wyjściowego przemiennika można sterować dwoma niezależnymi sygnałami częstotliwości f i napięcia u . Sygnały te podawane są do układu sterowania falownika z nastawnika sterowania automatycznego NA. Nastawnik automatyczny NA został zbudowany w oparciu o tranzystorowe wzmacniacze prądu stałego bez przetwarzania. Schemat strukturalny nastawnika automatycznego pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat strukturalny nastawnika automatycznego NA

Sterowanie prędkości obrotowej silnika, czyli jednocześnie zmianę amplitudy i częstotliwości napięcia zasilania stojana silnika można przeprowadzić w układzie nastawnika automatycznego NA za pomocą jednego sygnału sterującego "z" zadawanego z potencjometru P. Układ formowania UF pozwala

na liniowe lub skokowe narastanie w czasie sygnału "k". Na wyjściu bloku UM otrzymujemy jednakowy znak sygnału niezależnie od znaku sygnału zadającego "z". Układ sterowania falownika wymaga, aby sygnały sterujące (u, f) amplitudę i częstotliwość napięcia wyjściowego przemiennika były tego samego znaku niezależnie od kierunku prędkości silnika. Informację o kierunku prędkości silnika daje sygnał kolejności faz "k" do układu sterowania falownika. W zależności od znaku "k" otrzymujemy odpowiednią kolejność faz. Z wyrażenia (5) wynika, że częstotliwościowa regulacja prędkości obrotowej silnika asynchronicznego wymaga określonej zależności nieliniowej amplitudy napięcia zasilającego od częstotliwości. Przekształtnik nieliniowy UN pozwala na odcinkową aproksymację funkcji nieliniowej sygnału sterującego napięciem u od sygnału sterującego częstotliwością f. Sygnał sprzężenia prądowego "p" pochodzący z układu zabezpieczenia nadprądowego ZN zostaje doprowadzony do bloku odcięcia prądowego UP, który jest elementem nieliniowym ze strefą nieozułości. Jeżeli prąd silnika przekroczy określoną wartość, to na wyjściu układu odcięcia UP pojawi się sygnał "P_I", który na wejściu przekształtnika UN odejmuje się od sygnału "f", wpływając na zmniejszenie sygnału sterującego napięciem "u", a w rezultacie na zmniejszenie napięcia zasilającego.

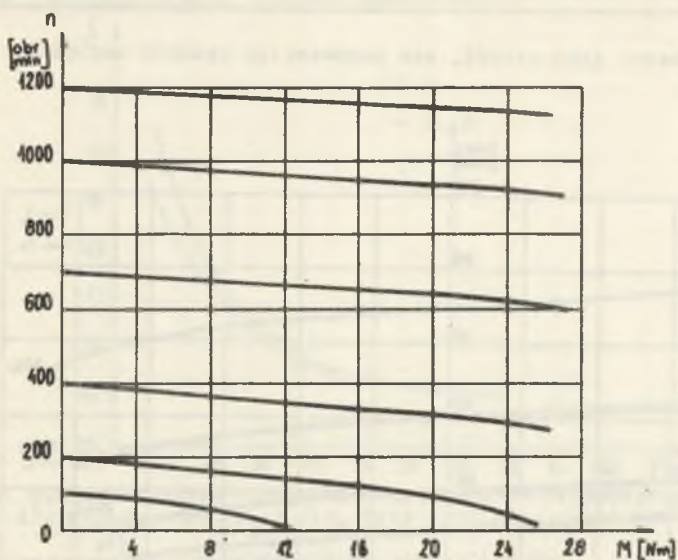
3. Wyniki badań modelowych

3.1. Charakterystyki statyczne

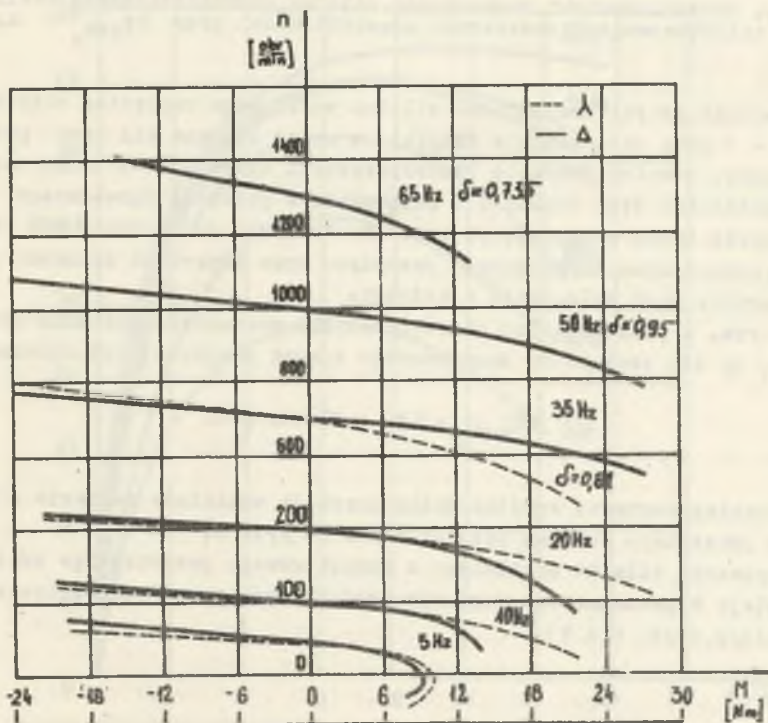
Na rys. 2 przedstawiono charakterystyki mechaniczne badanego silnika zasilanego napięciem sinusoidalnym z wirującej przetwornicy częstotliwości przy zachowaniu warunku $\frac{U}{f} = \frac{U_n}{f_n} = \text{const} (\delta=1)$ przy zmieniającym się obciążeniu. Przy niskich częstotliwościach widać wpływ rezystancji stojana powodującej wyraźne zmniejszenie charakterystyk mechanicznych.

Przy zasilaniu silnika z tyrystorowego przemiennika częstotliwości warunek $\frac{U_{1h}}{f} = \frac{U_n}{f_n}$ mógł być spełniony ze względu na ograniczone napięcie przemiennika tylko w zakresie częstotliwości 0 - 46 Hz przy połączeniu uzwojeń stojana silnika asynchronicznego w trójkąt i od 0 - 26 Hz przy połączeniu w gwiazdę. Charakterystyki dla częstotliwości 35 Hz przy połączeniu w gwiazdę oraz 50 Hz, 65 Hz przy połączeniu w trójkąt zdjęto dla stałej wartości napięcia pierwszej harmonicznej U_{1h} . Z wyrażenia (3) wynika, że moment krytyczny maleje wtedy odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu częstotliwości napięcia zasilającego.

W zakresie częstotliwości, w którym spełniony był warunek $\delta = 1$, charakterystyki mechaniczne silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości (rys. 3) są mniej sztywne niż przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym. Spowodowane jest to zarówno odkształconym napięciem zasilającym, jak również i spadkami napięcia w przemienniku (układ przemiennik częstotliwości - sil-

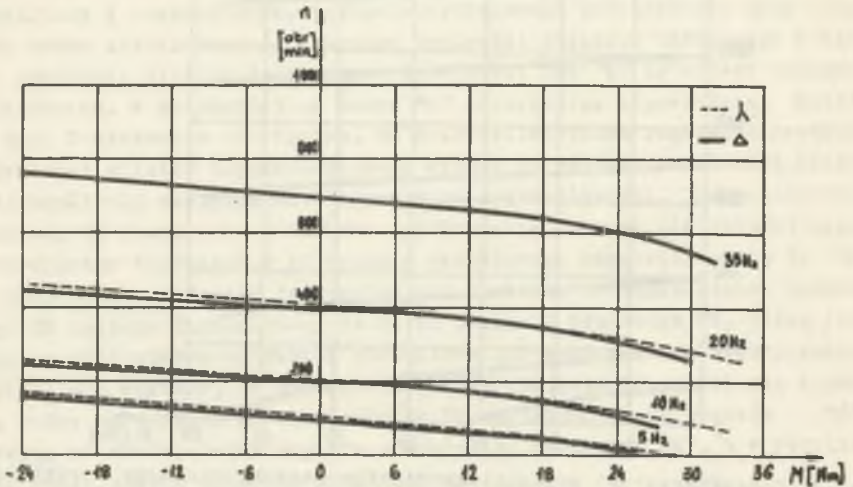


Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego zasilanego napięciem sinusoidalnym przy $\delta = 1$



Rys. 3. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego zasilanego z tyrystorowego przemiennika częstotliwości

nik potraktowano jako opóźność, nie kompensując spadków napięcia w prze-
mienniku).



Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego zasilanego z
tjrystorowego przeziennika ożęstotliwości przy $\Delta n_{M=M_n} = \Delta n_n$

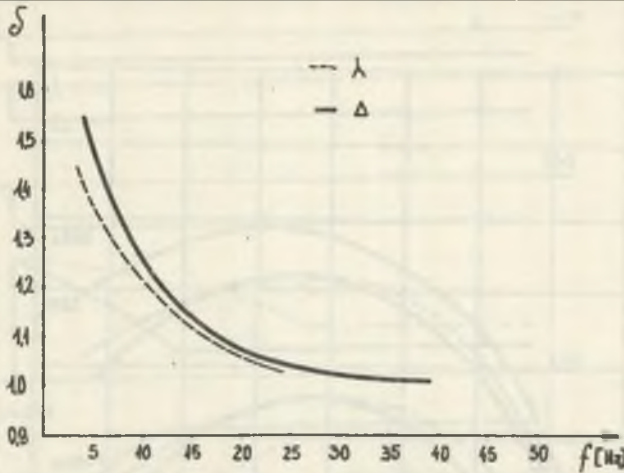
Charakterystyki mechaniczne silnika zasilanego napięciem sinusoidalnym dla $\delta = 1$ przy połączeniu w trójkąt są mniej sztywne niż przy połączeniu w gwiazdę. Również przebieg charakterystyki sprawności silnika zasilanego z przeziennika jest lepszy dla połączenia w gwiazdę. Spowodowane jest to przepływem prądu w zamkniętym obwodzie trójkąta pod wpływem SEM indukowanych przez wyższe harmoniczne przepływu oraz większymi spadkami napięcia w falowniku przy połączeniu w trójkąt.

Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki mechaniczne silnika przy U_{1h}/f takim, by dla obciążenia znamionowego spadek prędkości był znamionowy

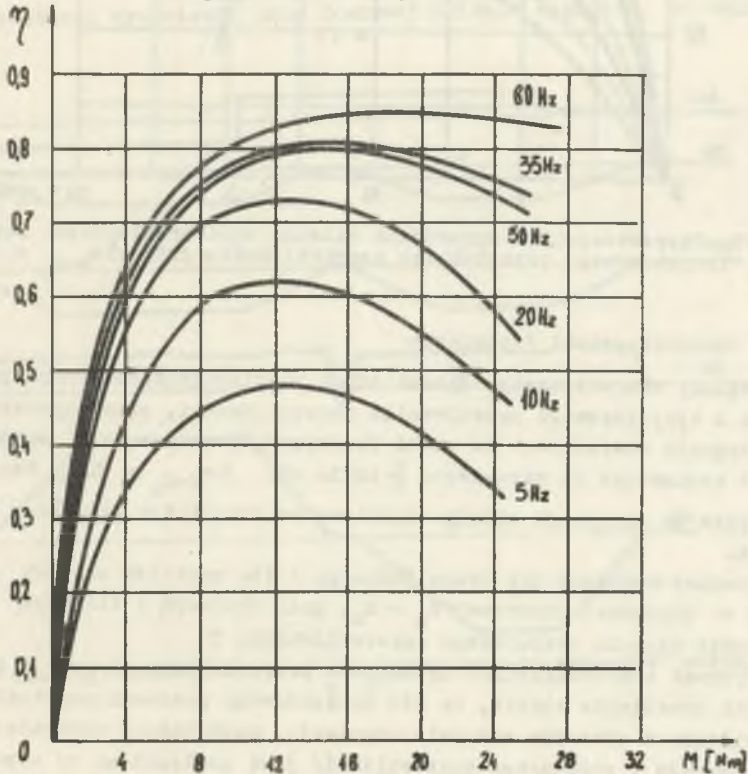
$$\Delta n_{M=M_n} = \Delta n_n = 80 \text{ obr/min.}$$

Przebieg wartości współczynnika korekcyj amplitudy napięcia dla zachowania powyższego warunku przedstawiono na rys. 5.

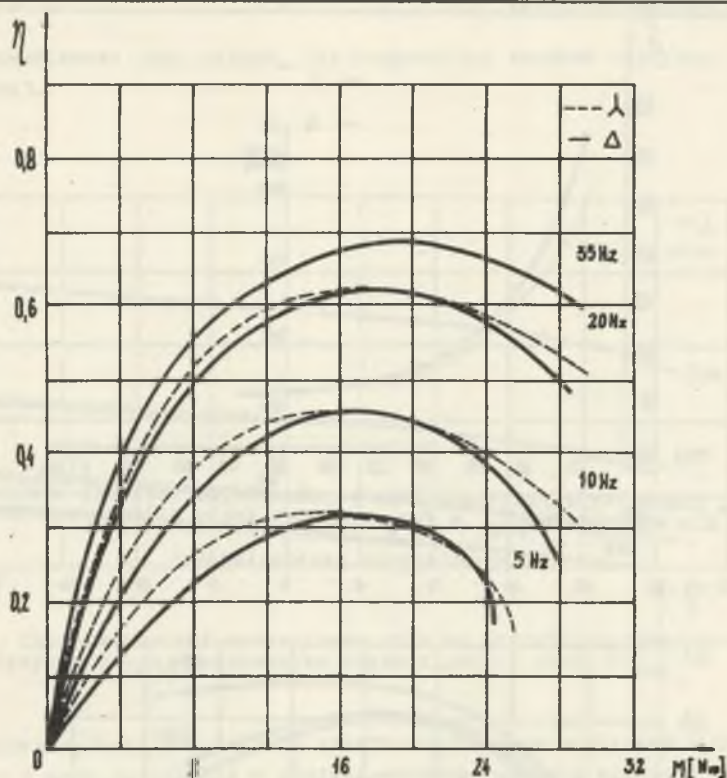
Sprawność silnika zasilanego z tjrystorowego przeziennika ożęstotliwości maleje w porównaniu z jego sprawnością przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym (rys. 6 i 7).



Rys. 5. Charakterystyki wymaganego współczynnika korekcji amplitudy napięcia δ dla warunku $\Delta n_{M=M_n} = \Delta n_n$ przy zasilaniu silnika asynchronicznego z przemiennika częstotliwości



Rys. 6. Charakterystyki sprawności silnika asynchronicznego zasilanego napięciem sinusoidalnym przy $\Delta n_{M=M_n} = \Delta n_n$



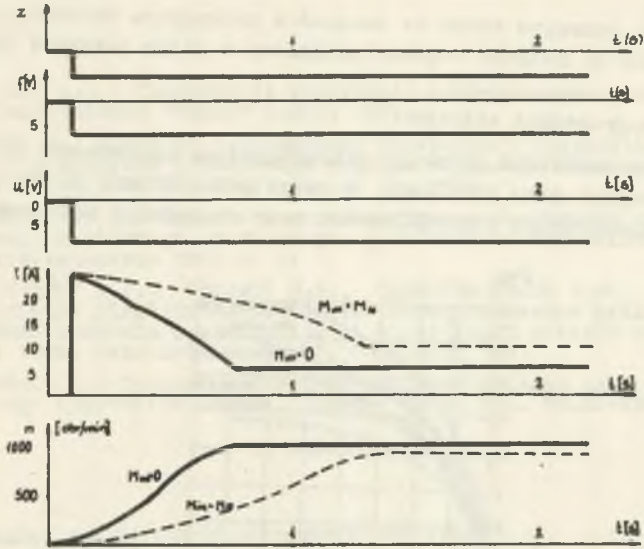
Rys. 7. Charakterystyki sprawności silnika asynchronicznego zasilanego z tyrystorowego przemiennika częstotliwości przy $\Delta n_{M=M_n} = \Delta n_n$

3.2. Charakterystyki dynamiczne

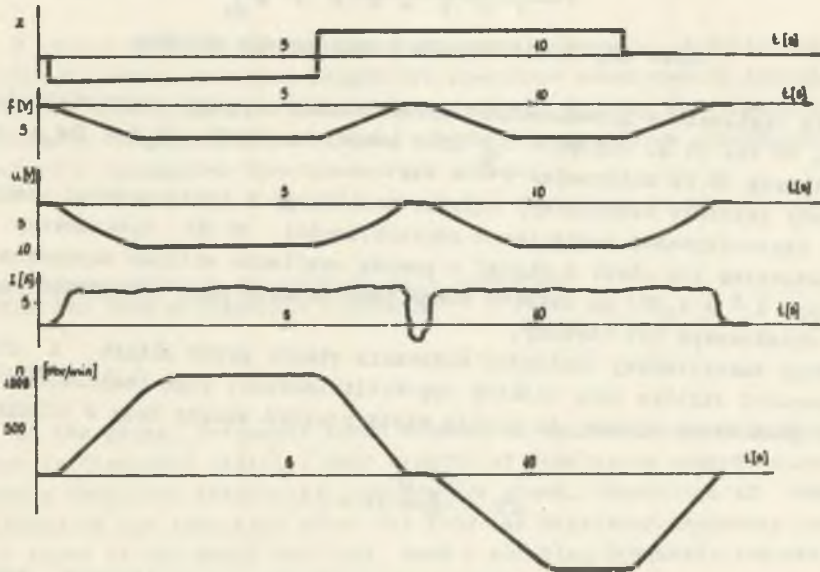
Pomiary charakterystyk dynamicznych silnika przeprowadzono przy zasilaniu z tyrystorowego przemiennika częstotliwości, przy skokowym zadawaniu sygnału sterującego na układ formujący UF nastawnika automatycznego NA. Z nastawnika NA uzyskiwano $\frac{U}{f}$ takie aby $\Delta n_{M=M_n} = \Delta n_n$. Częstotliwość napięcia na zaciskach silnika ustalona we wszystkich wypadkach wynosiła 50 Hz.

Pomiary wykonano dla biegu jałowego i dla momentów stałych niezależnych od prędkości obrotowej $M_n = M_n$, przy skokowym i liniowym narastaniu w czasie sygnału sterującego częstotliwością f .

Wybrane charakterystyki dynamiczne przedstawiono na rys. 8 i 9. Z otrzymanych przebiegów wynika, że dla prawidłowego rozruchu częstotliwościowego silnika w otwartym układzie regulacji, nastawienie szybkości narastania sygnału f zadającego częstotliwość jest uzależniona od momentu obciążenia i momentu bezwładności układu napędowego. Przy zbyt szybkim narastaniu częstotliwości rozruch traci charakter rozruchu częstotliwościowego.



Rys. 8. Przebiegi dynamiczne przy skokowej zmianie sygnałów sterujących f , u

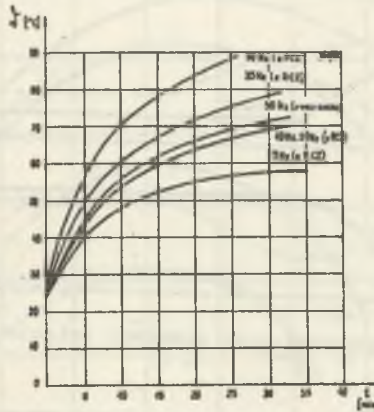


Rys. 9. Przebiegi dynamiczne przy liniowej zmianie sygnałów sterujących u , f

Skrócenie czasu rozruchu można by uzyskać w zamkniętym układzie regulacji który pozwoliłby na rozruch częstotliwościowy w całym zakresie prędkości.

3.3. Pomiarzy nagrzewania silnika

Rysunek 10 przedstawia przebieg charakterystyk nagrzewania silnika połączanego w trójkąt przy zasilaniu z sieci przemysłowej 50 Hz oraz z tyrystorowego przemiennika częstotliwości przy obciążeniu momentem znamionowym.



Rys. 10. Charakterystyki nagrzewania silnika

Dla zasilania z przemiennika częstotliwości przy częstotliwościach 5 Hz, 10 Hz, 35 Hz napięcie U_{1h} było takie, by $\Delta n(M = M_n) = \Delta n_n$, natomiast przy 50 Hz maksymalne ($\delta < 1$).

Duży przyrost temperatury silnika zasilanego z tyrystorowego przemiennika częstotliwości napięciem o częstotliwości 50 Hz spowodowany jest zwiększeniem się strat w miedzi z powodu zasilania silnika napięciem obniżonym ($\delta = 0,95$) na skutek czego prąd silnika przy obciążeniu momentem znamionowym był większy.

Mimo zmniejszonej zdolności oddawania ciepła przez silnik i niższej sprawności silnika przy niskich częstotliwościach, jego temperatura ustala się wtedy niższa, bo maleją wtedy również straty mocy w silniku

$$\Delta P = \frac{M_n \cdot \omega}{\eta} (1 - \eta). \quad (7)$$

Możliwa jest więc ciągła praca silnika obciążonego znamionowym momentem przy niskich wartościach prędkości obrotowej.

LITERATURA

1. BUŁGAKOW A.A.: Czastotnoje upravljenje asinchronnymi elektrowigatieliami. Izdatielstwo "Nauka" Moskwa 1966.
2. GRZESIK B., WOSIŃSKI H.: Modelowy przemiennik częstotliwości z kształtowaniem napięcia wyjściowego poprzez modulację szerokości impulsów. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Elektryka nr 36, 1972.
3. PRZEŹDZIECKI F.: Badanie charakterystyk mechanicznych silnika asynchronicznego klatkowego zasilanego z falownika tyrystorowego. Przegląd Elektrotechniczny 1968 Z. 5.
4. CHMUDCHANOW M.Z., USMANOW S.Z., USMANCHODZAJEW N.M., CHASANOW M.A.: Czastotnije riegulirovanie skosti elektropriwodow pieremiennogo toka s awtomaticheskim upravlieniem ot wientilnykh prieobrazowatelej, Tashkent 1966. Izdatielstwo "Fan", Uzbekskoj SSR.
5. KRYKOWSKI K.: Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego sterowanego częstotliwościowo. Zeszyty Nauk. Pol. Śl. Elektryka nr 27/1970.

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО КЛЕТЧОГО ДВИГАТЕЛЯ
ПИТАЕМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Р е з ю м е

В статье рассмотрено частотное управление скорости асинхронных двигателей. Изложено некоторые результаты измерений асинхронного двигателя питаемого тиристорным преобразователем частоты. В труде сопоставлены характеристики асинхронного двигателя, питаемого тиристорным преобразователем частоты и вращающего преобразователя частоты.

AN INVESTIGATION OF AN SQUIRREL-CAGE INDUCTION
MOTOR FED FROM A FREQUENCY CONVERTER

S u m m a r y

In the paper, frequency speed control of squirrel-cage induction motors is discussed briefly. Some results of testing an induction motor fed from a thyristor frequency converter are given. Comparison of characteristics of the induction motor fed from the thyristor frequency converter and those of the motor when fed from a rotating frequency converter is given.