

Adam RÓŻYCKI

NAGRZEWANIE SILNIKA INDUKCYJNEGO METODĄ "DWU CZĘSTOTLIWOŚCI"

Streszczenie. W artykule podano wyniki pomiarów nagrzewania 3-fazowego silnika indukcyjnego klatkowego metodą sztucznego obciążenia. Przeprowadzono porównania charakterystyk $\vartheta = f(t)$ przy $I = I_n$, zdjętych metodą bezpośredniego obciążenia przy U_n, f_n i przy zasilaniu uzwojeń stojana odpowiednio dobranymi napięciami U_1, U_2 o częstotliwościach f_1, f_2 , wymuszających prąd obciążenia silnika.

TEMPERATURE TEST OF INDUCTION MOTOR BY MEANS OF TWO-FREQUENCY SUPPLY

Summary. In the article the results of laboratory tests of a three-phase squirrel-cage motor by synthetically loaded heat run have been presented. Temperature tests are conducted to compare temperature rise $\vartheta = f(t)$ under nominal operating conditions $I = I_n$ obtained by two methods; one-by conventional heat run in which the motor shaft is mechanically loaded, and the other - by the two-frequency method. The frequency and voltage should be set in such manner that the stator current is equal to the rated value.

НАГРЕВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ДВУХ ЧАСТОТ

Резюме. В статье представлены результаты измерений нагревания трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором методом искусственной нагрузки. Произведено сравнение характеристик $\vartheta = f(t)$ при $I = I_n$ снятых методом непосредственной нагрузки при U_n, f_n и соответствующими им частотами f_1 и f_2 задающими величину тока равную номинальному значению.

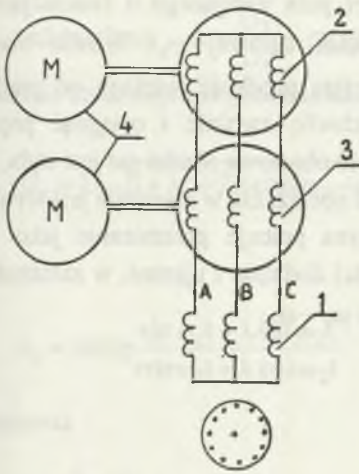
1. WSTĘP

Określenie pola temperaturowego w maszynie elektrycznej, przy znamionowych lub innych zadanych z góry warunkach obciążeniowych dla wyznaczenia np. ustalonych temperatur odpowiednich węzłów cieplnych, czy też cieplnych stałych czasowych lub prędkości narastania temperatur, wymaga przeprowadzenia próby nagrzewania metodą bezpośredniego obciążenia. Jeżeli z jakichkolwiek przyczyn nie można przeprowadzić próby nagrzewania silnika tą metodą, np. z braku maszyny obciążającej, hamownic, rezystorów obciążeniowych, trudności zesprzężenia badanego silnika z prądnicą obciążającą, np. w przypadku silników budowy pionowej, zachodzi potrzeba uciekania się do metod obciążenia zastępczego. Do jednej z nich należy metoda "dwu częstotliwości", przedstawiona przez A. Ytterberga w 1921 r. i rozwijana przez A.W. Krona [1], W. Wilda [2], A. Meyera [3], H. W. Lorenzena [4] i innych. Polega ona na zasilaniu nieobciążonego trójfazowego silnika indukcyjnego układem napięć z szeregowo połączonych dwóch prądnic synchronicznych (rys.1). Pierwsza z nich, tj. prądnica podstawowa 2, zasila uzwojenia stojana badanego silnika 1 napięciem bliskim do znamionowego U_1 , przy częstotliwości $f_1 = 50\text{Hz}$, druga, tj. pomocnicza 3 - obniżonym napięciem U_2 , np. $U_2 = 0,25 U_1$, przy obniżonej częstotliwości f_2 np. $f_2 = 0,9 f_1$. W charakterze prądnicy podstawowej można wykorzystać trójfazową sieć energetyczną. Przez odpowiednie wyregulowanie napięcia U_2 i częstotliwości f_2 można wymusić w silniku prądy znamionowe i straty w żelazie bliskie do tych, jakie występują przy normalnej pracy silnika, a tym samym zrealizować stan sztucznego obciążenia silnika.

Celem pracy jest doświadczalne zbadanie, przy jakich parametrach U_2, f_2 osiąga się w metodzie "dwu częstotliwości" najlepszą zbieżność stanu cieplnego silnika zarówno w stanie cieplnym nieustalonym, jak i ustalonym w porównaniu do konwencjonalnej metody bezpośredniego obciążenia.

2. UPROSZCZONA ANALIZA PRACY SILNIKA PODCZAS ZASILANIA UKŁADEM NAPIĘĆ O RÓŻNYCH CZĘSTOTLIWOŚCIACH

Ścisła matematyczna analiza pracy silnika przy zasilaniu uzwojeń stojana układem napięć U_1 przy f_1 oraz U_2 przy f_2 (rys. 2) wymagać będzie rozwiązania układu równań stanu elektrodynamicznego przy zmiennej prędkości wirowania, gdyż, jak to zostanie

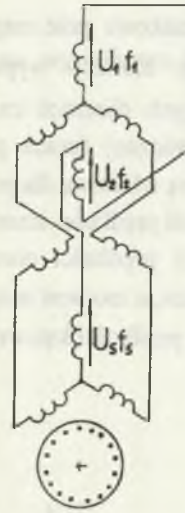


Rys.1. Układ połączeń trójfazowego silnika indukcyjnego, klatkowego przy próbie obciążenia metodą "dwu częstotliwości";

- 1 - silnik badany,
- 2 - prądnica synchroniczna podstawowa U_1, f_1 ,
- 3 - prądnica pomocnicza, dodawcza U_2, f_2 ,
- 4 - silniki napędzające prądnice

Fig.1 Arrangement of the three-phase squirrel cage induction motor fed with two frequencies;

- 1 - induction motor (test machine),
- 2 - machine generating the main system U_1, f_1 ,
- 3 - machine generating the auxiliary system U_2, f_2 ,
- 4 - driving motors



Rys.2. Układ napięć zasilających uzwojenie stojana w metodzie "dwu częstotliwości";

- U_1, f_1 - napięcie podstawowe,
 U_2, f_2 - napięcie pomocnicze,
 U_s, f_s - napięcie wypadkowe

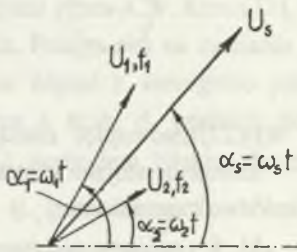
Fig. 2. Arrangement of supply of the stator winding in the two frequency method;

- U_1, f_1 - main voltage,
 U_2, f_2 - auxiliary voltage
 U_s, f_s - resultant voltage

wyjaśnione później, badana maszyna pracuje z oscylacją wirnika dookoła prędkości synchronicznej.

Uproszczony opis matematyczny przy założeniu liniowości charakterystyki magnesowania bazuje na superpozycji pól magnetycznych wytworzonych przez dwa układy napięć połączonych szeregowo. Każdy z nich wytwarza falę strumienia różniącą się amplitudą B_1, B_2 i prędkością kątową ω_1, ω_2 .

Wypadkowe pole magnetyczne ma charakter pola wirującego o zmieniającej się w czasie indukcji wypadkowej B_s i prędkości kątowej ω_s . Wmirik maszyny w pewnych okresach czasu przyspiesza, osiągając prędkość większą od prędkości synchronicznej (praca prądnicowa), aby za chwilę zwolnić i osiągnąć prędkość obrotową właściwą dla pracy silnikowej. Prędkość obrotowa silnika nie jest stała, waha się wokół prędkości średniej. Wymuszenie prądu obciążenia w maszynie jest wynikiem oscylacji prędkości obrotowej wirnika. Maszyna pracuje przemiennie jako silnik i prądnicą, a moment osiąga na przemian wartości dodatnie i ujemne, w zależności od różnicy prędkości kątowej pola stojana i wirnika $\omega_s - \omega_r$.



Rys.3. Zespolowy wykres wektorowy dla wyznaczenia U_s i ω_s

Fig. 3. Phasor diagram of rotating flux waves for estimating of U_s i ω_s

Zakładając proporcjonalność między strumieniami a napięciami, posługując się wykresem wektorowym z rys. 3, można wyznaczyć wypadkowe napięcie zasilania uzwojeń stojana oraz jego prędkość kątową.

Z wykresu na rys. 3

$$U_s^2 = (U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t)^2 + (U_1 \sin \omega_1 t + U_2 \sin \omega_2 t)^2. \quad (1)$$

Po przekształceniu i uproszczeniu

$$U_s^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2 U_1 U_2 (\sin \omega_1 t \sin \omega_2 t + \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t) \quad (2a)$$

lub

$$U_s^2 = U_1^2 \left[1 + \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 + 2 \frac{U_2}{U_1} \cos(\omega_1 - \omega_2) t \right], \quad (2b)$$

a po podstawieniu $\lambda = \frac{U_2}{U_1}$ otrzymuje się wyrażenie na wypadkowe napięcie przyłożone do uzwojeń stojana silnika w postaci:

$$U_s = U_1 \sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos(\omega_1 - \omega_2)t} \quad (3)$$

przy

$$\alpha_s = \arctg \frac{\sin \omega_1 t + \lambda \sin \omega_2 t}{\cos \omega_1 t + \lambda \cos \omega_2 t} \quad (4)$$

Ponieważ

$$\alpha_s = \int \omega_s dt, \quad (5)$$

więc prędkość kątowna wypadkowego napięcia U_s wynosi:

$$\omega_s = \omega_1 \left[\frac{1 + \chi^2 + (1 + \chi)\lambda \cos(\omega_1 - \omega_2)t}{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos(\omega_1 - \omega_2)t} \right], \quad (6)$$

gdzie przyjęto $\chi = \omega_2 / \omega_1$.

Ponieważ

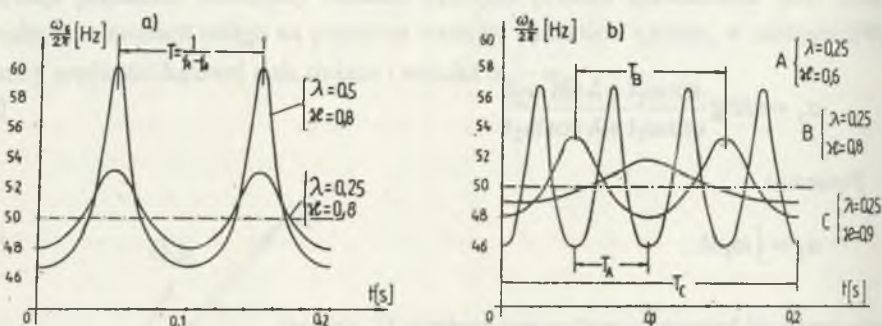
$$U_s \cos \alpha_s = U_1 (\cos \omega_1 t + \lambda \cos \omega_2 t), \quad (7)$$

stąd porównując wzór (7) z (3) otrzymujemy:

$$\cos \alpha_s = \frac{\cos \omega_1 t + \lambda \cos \omega_2 t}{\sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos(\omega_1 - \omega_2)t}}. \quad (8)$$

Wyprowadzone zależności potwierdzają, że zarówno wypadkowe napięcie w stojanie U_s , jak i prędkość kątowna pola stojana ω_s są funkcją stosunku napięć λ i częstotliwości χ .

Na rys. 4a wykreślono zmianę prędkości kątowej fali strumienia magnetycznego w funkcji czasu dla różnych stosunków napięć λ , przy stałym stosunku częstotliwości $\chi = 0,8$. W porównaniu do stałej prędkości kątowej wirowania pola magnetycznego, jakie występuje przy $\chi = 1$, $\lambda \neq 1$, widać, że ze wzrostem stosunku λ , czyli wzrostem napięcia dodatkowego U_2 przy $f_2 = \text{const}$, obserwuje się wzrost zmian prędkości. Oznacza to, że prądy obciążenia silnika i zmienny moment obciążenia są większe.



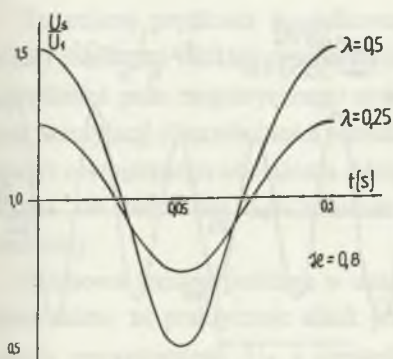
Rys. 4. Zmiana prędkości kątowej fali pola magnetycznego stojana w funkcji czasu dla:
 a) różnych stosunków napięć λ , przy $\chi = \text{const}$,
 b) różnych stosunków częstotliwości χ , przy $\lambda = \text{const}$.

Fig. 4. Change of the angular velocity of stator flux waves as a function of time for:
 a) different rate of voltages λ , $\chi = \text{const}$,
 b) different rate of frequencies χ , $\lambda = \text{const}$.

Z rys. 4a wynika również, że częstotliwość oscylacji prędkości obrotowej jest niezależna od stosunku amplitudy napięć zasilania λ . Zależy ona tylko od różnicy zmian częstotliwości zasilania prądnicy podstawowej f_1 i dodatkowej f_2 , gdyż $T = 1/(f_1 - f_2)$.

Na rys. 4 b wykreślono zmianę prędkości kątowej fali pola magnetycznego stojana w funkcji czasu dla różnych stosunków częstotliwości χ przy $\lambda = \text{const}$. Przy zachowaniu stałości λ zwiększenie różnicy częstotliwości $\omega_1 - \omega_2$, czyli zmniejszenie ω_2 przy $\omega_1 = \text{const}$, powoduje wzrost prędkości kątowej wirowania pola stojana. Prowadzi to do wzrostu częstotliwości oscylacji prędkości fali stojana. Z obserwacji wykresów z rys. 4a, 4b można wyciągnąć wniosek, że wzrost λ oraz zmniejszenie χ z punktu widzenia teoretycznego sprzyja lepszemu obciążalności silnika podczas biegu jałowego.

Na rys. 5 podano przykładową zależność stosunku wypadkowego napięcia U_s do napięcia U_1 w funkcji czasu dla $\chi = \text{const}$, przy różnych wartościach λ . Z krzywych wynika, że np. przy $\lambda = 0,5$ tj. gdy $U_2 = 0,5U_1$ przy $\chi = 0,8$, wypadkowe napięcie na stojanie zmienia się w granicach (0,5 do 1,5) U_1 . Zbyt wysoka wartość napięcia wypadkowego, może powodować podwyższenie strat w żelazie, a także może być szkodliwa dla izolacji uzwojeń stojana.

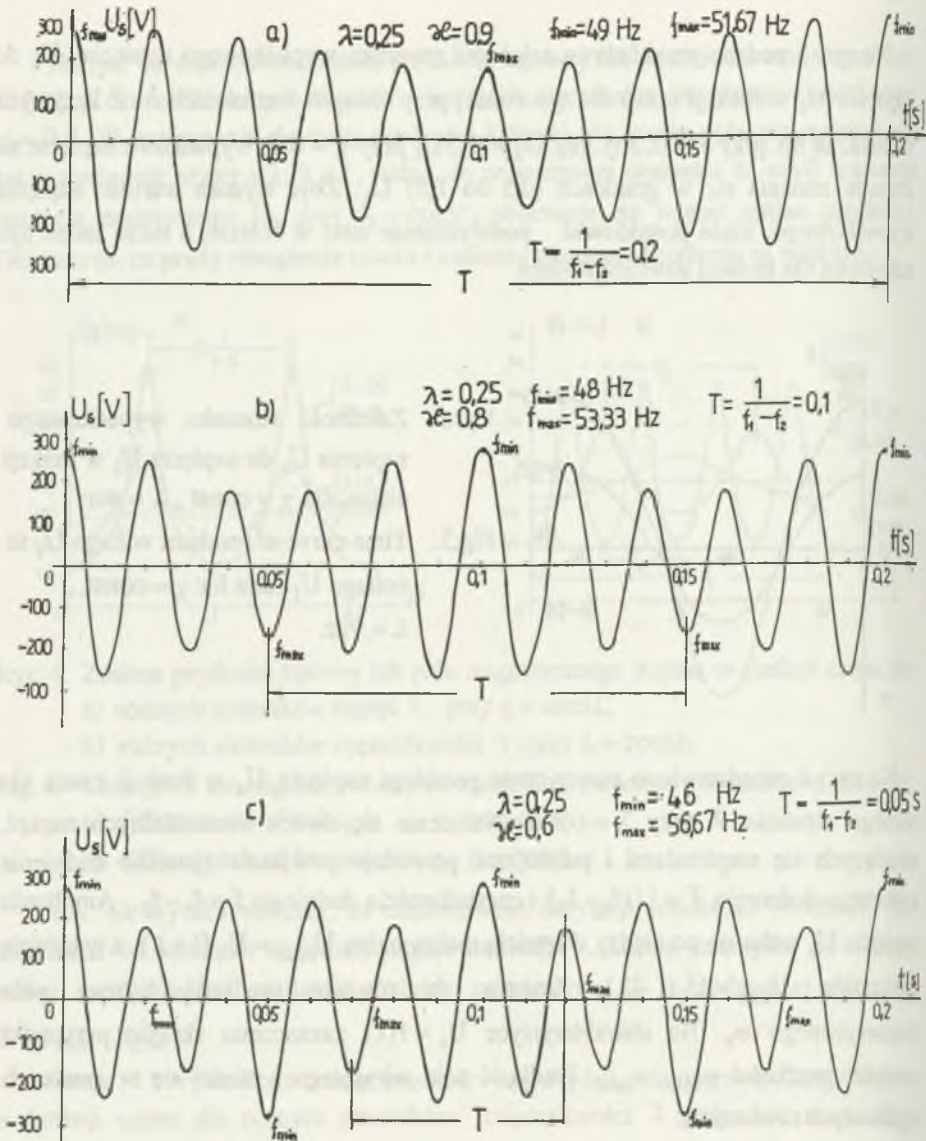


Rys.5. Zależność stosunku wypadkowego napięcia U_s do napięcia U_1 w funkcji czasu, dla $\chi = \text{const}$, $\lambda = \text{var}$.

Fig.5. Time curve of resultant voltage U_s to voltage U_1 ratio for $\chi = \text{const}$, $\lambda = \text{var}$.

Na rys. 6 przedstawiono teoretycznie przebiegi napięcia U_s w funkcji czasu dla różnego stosunku χ przy $\lambda = \text{const}$. Nałożenie się dwóch sinusoidalnych napięć, różniących się amplitudami i pulsacjami, powoduje powstanie zjawiska dudnienia z okresem dudnienia $T = 1/(f_1 - f_2)$ i częstotliwością dudnienia $f = f_1 - f_2$. Amplituda napięcia U_s waha się pomiędzy wartością maksymalną $U_{\max} = U_1(1 + \lambda)$, a wartością minimalną $U_{\min} = U_1(1 - \lambda)$. Zmienia się również prędkość kątowna pola magnetycznego ω_s . Na charakterystyce $U_s = f(t)$ zaznaczono skrajne przypadki wartości prędkości ω_{\max} , ω_{\min} . Prędkość pola wirującego i mieści się w granicach wyrażonych równaniem:

$$\omega_1 \frac{1 + \chi\lambda}{1 + \lambda} < \omega_s < \omega_1 \frac{1 - \chi\lambda}{1 - \lambda} \quad (9)$$



Rys.6. Zależność napięcia U_s w funkcji czasu przy :

a) $\lambda = 0,25$, $\chi = 0,9$, b) $\lambda = 0,25$, $\chi = 0,8$, c) $\lambda = 0,25$, $\chi = 0,6$

Fig. 6. Time curve of voltage U_s for:

a) $\lambda = 0,25$, $\chi = 0,9$, b) $\lambda = 0,25$, $\chi = 0,8$, c) $\lambda = 0,25$, $\chi = 0,6$

W rozpatrywanych przypadkach (rys. 6) otrzymujemy dla:

$$\chi = 0,9, \omega_{\min} = 307,87 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, f_{\min} = 49 \text{ Hz}, \omega_{\max} = 324,63 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, f_{\max} = 51,66 \text{ Hz},$$

$$\chi = 0,8, \omega_{\min} = 301,59 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, f_{\min} = 48 \text{ Hz}, \omega_{\max} = 335,10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, f_{\max} = 53,33 \text{ Hz},$$

$$\chi = 0,6, \omega_{\min} = 289,03 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, f_{\min} = 46 \text{ Hz}, \omega_{\max} = 356,05 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, f_{\max} = 56,67 \text{ Hz}.$$

We wszystkich trzech przypadkach $\lambda = 0,25$, czyli $U_{\min} = 165 \text{ V}$, $U_{\max} = 275 \text{ V}$, gdyż U_1 przyjęto równe 220 V .

Te zmiany prędkości wypadkowego pola stojana są znaczne i oscylują wokół średniej prędkości bliskiej synchronicznej. Prędkość wirowania wirnika jest zbliżona do prędkości pola magnetycznego stojana, ograniczona jedynie pokonaniem oporów tarcia, wentylacji i bezwładności wirnika, ponieważ wał silnika nie jest podłączony do żadnego zewnętrznego obciążenia. Mimo, że średnia prędkość wirowania wirnika jest zbliżona do prędkości synchronicznej, wirnik jest na przemian przyspieszany i zwalniany.

Okresowa zmiana poślizgu w czasie wywołuje wymuszenie prądu w uzwojeniu stojana mimo że praktycznie silnik pracuje w stanie jałowym. Przez doregulowanie napięcia pomocniczego U_2 i częstotliwości f_2 , a więc przez odpowiedni dobór parametrów λ i χ , można spowodować obciążenie silnika.

Z dużym uproszczeniem dla wyznaczenia przebiegów ruchowych silnika można skorzystać z uproszczonego wzoru Klossa, rozpisanego dla dwu przypadków pracy, przy U_n, f_n oraz U_x, f_x , gdzie symbolem x oznaczono warunki pracy przy sztucznym obciążeniu:

$$\frac{M_n}{M_{\max(n)}} = 2 \frac{s_n}{s_{\max(n)}} \quad \text{oraz} \quad \frac{M_x}{M_{\max(x)}} = 2 \frac{s_x}{s_{\max(x)}}. \quad (10)$$

Uwzględniając jedynie wpływ napięcia zasilania na wartość momentu krytycznego, wyrażenie na dowolny moment rozwijany przez maszynę przyjmuje postać:

$$M_x = \frac{s_x}{s_n} \left[\frac{U_x}{U_n} \right]^2 M_n, \quad s_x = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}. \quad (11)$$

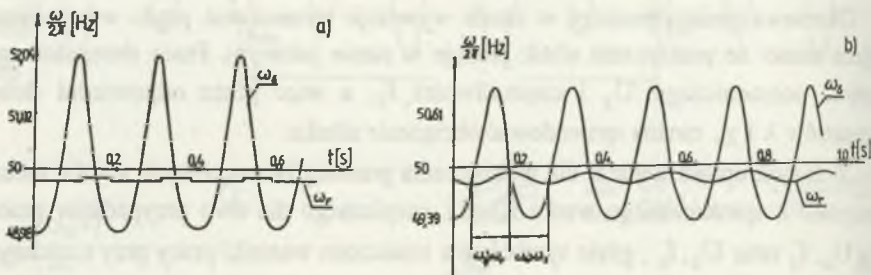
Ponadto, w celu oszacowania charakteru przebiegów prędkości wirnika, pomijając elektromagnetyczne stany przejściowe, z dużym przybliżeniem można napisać:

$$M_d = J \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{s_x}{s_n} \left[\frac{U_s}{U_n} \right]^2 M_n \quad (12)$$

a stąd

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M_n}{J s_n} \left(\frac{U_s}{U_n} \right)^2 \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right) \quad (13)$$

gdzie $U_s = U_x$ jest wypadkowym napięciem przyłożonym na silnik (3), ω_s - mechaniczną prędkością kątową pola wirującego (6). Zarówno U_s jak i ω_s są funkcjami czasu. Równanie (13) zostało rozwiązane metodą Rungego-Kutty na komputerze Amstrad. Na rys. 7a przedstawiono $\omega_s = f(t)$, $\omega_r = f(t)$ dla badanego silnika asynchronicznego $P = 3$ kW przy $\lambda = 0,25$, $\chi = 0,9$.



Rys. 7. Zależność ω_s, ω_r w funkcji czasu dla silnika indukcyjnego o mocy:

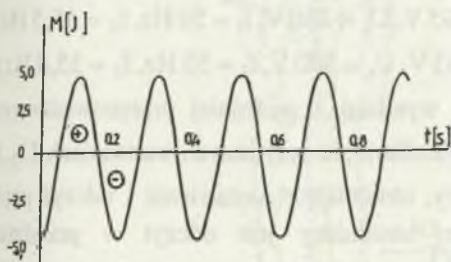
a) 3 kW, b) 1000 kW

Fig. 7. Time curve of ω_s, ω_r for the induction motor of power:

a) 3 kW, b) 1000 kW

Zmiana prędkości kątowej wirnika jest niewielka, niemniej widoczna. W celu lepszego zobrazowania zmian ω_r przeprowadzono ponowne obliczenia dla silnika o większej mocy $P_n = 1000$ kW przy $\lambda = 0,2$, $\chi = 0,9$. Wyniki obliczeń w postaci wykresu zależności $\omega_s = f(t)$ oraz $\omega_r = f(t)$ podano na rys 7b. Można zauważyć, że okres zmian prędkości kątowej wynosi 0,2 s, przy średniej prędkości $\omega_r = 2\pi f_r = 49,66$ Hz i różnicy około 1 Hz między wartością maksymalną a minimalną.

Na rys. 8 przedstawiono przebieg momentu rozwijanego przez maszynę indukcyjną w funkcji czasu podczas próby sztucznego obciążenia.



Rys. 8. Moment obrotowy rozwijany przez silnik podczas próby obciążenia metodą "dwa częstotliwości"

Fig. 8. Time curve of torque developed by the motor during the heat run by means of two-frequency supply

3. PRÓBA NAGRZEWANIA SILNIKA INDUKCYJNEGO METODĄ "DWU CZĘSTOTLIWOŚCI"

Przedmiotem badań był trójfazowy silnik indukcyjny klatkowy o następujących danych: typ SZJe-34, $P_n = 3 \text{ kW}$, $U_n = 220\text{V} / 380 \text{ V}$, $I_n = 11,3 \text{ A} / 6,5 \text{ A}$, $n_n = 1430 \text{ obr./min}$. Jako prądnicę pomocniczą, dodatkową, wykorzystano trójfazową prądnicę synchroniczną o następujących danych: typ 6BOd 22b, $P_n = 4 \text{ kW}$, $U_n = 400 \text{ V}$, $I_n = 7,2 \text{ A}$, $n_n = 3000 \text{ obr./min}$, $U_w = 12 \text{ V}$, napędzana silnikiem prądu stałego, obcowzbudnym z możliwością nastawy prędkości obrotowej w szerokim zakresie. Źródłem podstawowego napięcia była trójfazowa sieć, od której zasilany był regulator indukcyjny. Napięcie wyjściowe U_1, f_1 z regulatora indukcyjnego podawane było na zaciski stojana silnika.

Ponieważ prądnicą pomocniczą posiadała tylko trzy wyprowadzenia z uzwojeń stojana, zastosowano trójfazowy transformator dodatkowy, którego uzwojenia pierwotne zasilano z prądnicy synchronicznej, a uzwojenie wtórne szeregowo włączono między regulator indukcyjny a uzwojenia badanego silnika. Po rozruchu silnika prądu stałego (rys. 9) i wzbudzeniu prądnicy synchronicznej do napięcia U_2 przy f_2 przeprowadzono rozruch silnika indukcyjnego, zasilając uzwojenie stojana napięciem U_1 przy f_1 . Po wykonaniu powyższych czynności załączono wyłącznik W3 i

doregulowano napięcie U_2 , f_2 dla uzyskania znamionowego prądu obciążenia silnika.

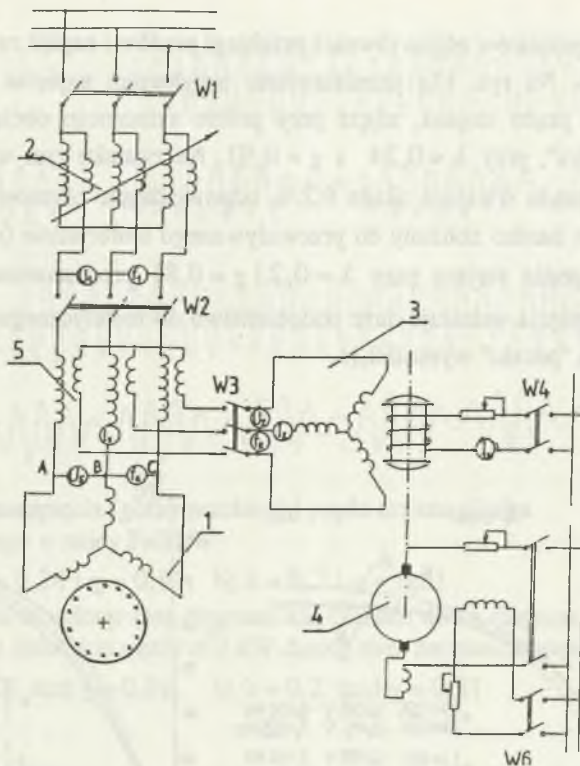
Próbie sztucznego obciążenia silnika indukcyjnego [5] wykonano przy znamionowym prądzie obciążenia stojana $I_n = 6,5$ A dla dwóch różnych warunków:

a) $\lambda = 0,24$, $\chi = 0,91$ ($U_1 = 395$ V, $U_2 = 95$ V, $U_s = 380$ V, $f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 45,5$ Hz)

b) $\lambda = 0,16$, $\chi = 0,71$ ($U_1 = 395$ V, $U_2 = 63$ V, $U_s = 380$ V, $f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 35,5$ Hz).

Wybór napięcia U_2 i częstotliwości f_2 wynikał z wcześniej przeprowadzonych pomiarów wstępnych, podczas których stwierdzono, że przy innych wartościach U_2, f_2 występują wahania wskazań amperomierzy, utrudniające nastawienie i odczyt prądu stojana. Zaobserwowano, że najbardziej utrudniony jest odczyt w przedziale $f_2 = 36,5$ Hz do 55 Hz. Należy więc wykluczyć zasilanie napięciem dodatkowym z tego przedziału częstotliwości. Stwierdzono, że przy $U_2 = 60$ V w przedziale $f_2 = 36,5$ Hz do 38 Hz oraz przy $U_2 = 80$ V w przedziale $f_2 = 43$ Hz do 46 Hz uzyskuje się prąd znamionowy w badanym silniku. Zaobserwowano również, że wybór napięcia U_2 narzuca częstotliwość f_2 zapewniającą znamionowe obciążenie prądowe silnika. Podczas próby nagrzewania zachodziła konieczność doregulowania prądu obciążenia przez nieznaczną zmianę napięcia i częstotliwości pomocniczej prądnicy synchronicznej.

Charakterystykę nagrzewania $\vartheta = f(t)$ wykreślono na podstawie odczytu wskazań termopar, które zostały umieszczone w uzwojeniach stojana i wirnika. W stojanie zamontowano 6 termopar - dwie na połączeniach czołowych od strony przewietrznika, dwie na czołach od strony przeciwnej oraz dwie umieszczono w żłobkach stojana. Trzy termopary umieszczono w wirniku, dwie w pierścieniu zawierającym a jedną w żelazie wirnika. Dla przeniesienia sygnału z wirnika do miernika zastosowano głowicę Hottingera. W celach porównawczych przeprowadzono próbę nagrzewania silnika przy znamionowym prądzie obciążenia i przy znamionowym napięciu zasilania, obciążając silnik prądnicą prądu stałego, pracującą na odbiornik.

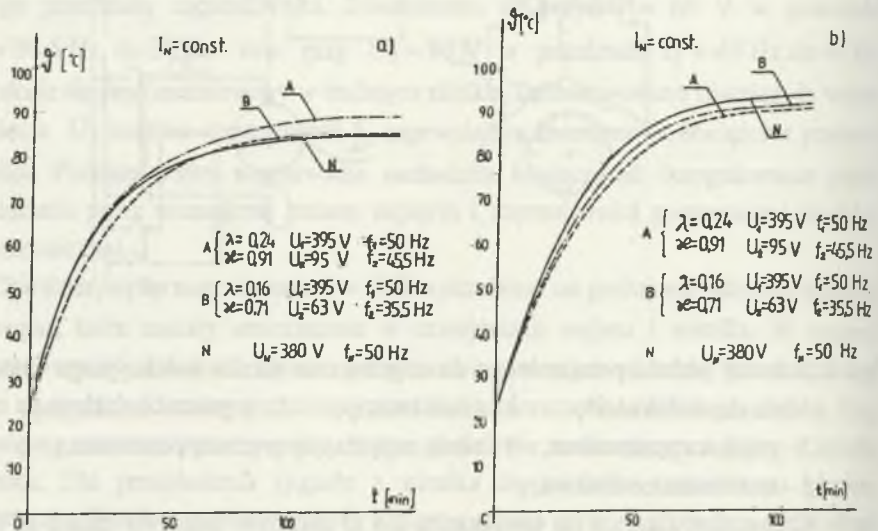


Rys. 9. Schemat układu pomiarowego do nagrzewania silnika indukcyjnego metodą "dwu częstotliwości"; 1 - silnik badany, 2 - regulator indukcyjny, 3 - prądnicza pomocnicza, 4 - silnik napędzający prądnicę pomocniczą, 5 - transformator dodawczy

Fig. 9. Connection diagram for temperature test of induction motor by means of two frequency method; 1- tested motor, 2 - polyphase induction regulator, 3 - generator of auxiliary voltage, 4 - motor driving auxiliary generator 5- auxiliary transformer

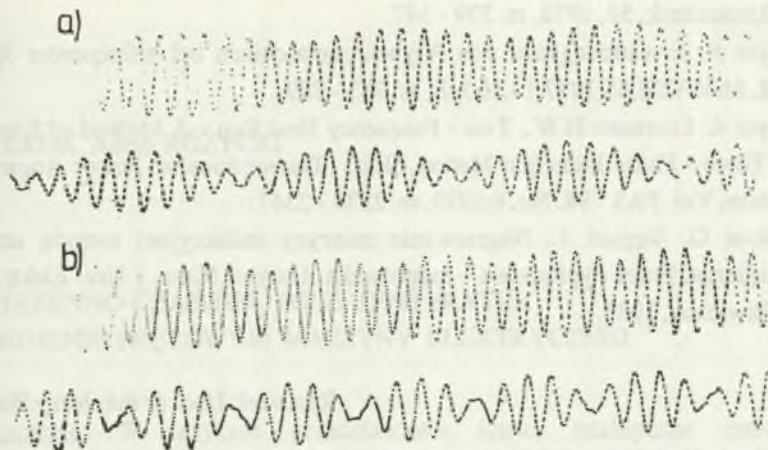
Na rys. 10 wykreślono krzywe nagrzewania $\vartheta = f(t)$ uzwojeń stojana (żłobek w górnej części kadłuba) oraz krzywe $\vartheta = f(t)$ wirnika (pierścień zwierający) dla dwóch różnych warunków λ i λ . Z wykresów wynika, że w przypadku uzwojeń stojana, temperatury ustalone uzwojeń w części żłobkowej są nieco większe (88°C), zaś w przypadku wirnika trochę niższe (90°C) od temperatur zmierzonych metodą bezpośredniego obciążenia (84°C i 93°C).

Podczas pomiarów zdjęto również przebiegi prądów i napięć za pomocą oscylografu pętlicowego. Na rys. 11a przedstawiono oscylogram napięcia (górne przebiegi) i oscylogram prądu stojana, zdjęte przy próbie sztucznego obciążenia metodą "dwu częstotliwości", przy $\lambda = 0,24$ i $\chi = 0,91$. Na rysunku tym widoczne są "paczki" napięcia i prądu trwające około 0,2 s, odpowiadające okresowi dudnienia. Kształt napięcia jest bardzo zbliżony do przewidywanego teoretycznie (rys. 6a). Oscylogram napięcia i prądu stojana przy $\lambda = 0,2$ i $\chi = 0,81$ przedstawione są na rys. 11 b. Przebieg napięcia wskazuje duże podobieństwo do teoretycznego (rys. 6b), w którym czas trwania "paczki" wynosił 0,1s.



Rys. 10. Charakterystyka nagrzewania $\Theta = f(t)$; a) uzwojeń w żłobku stojana, b) w żłobku wirnika, podczas obciążenia bezpośredniego (krzywa N) i przy zastosowaniu metody "dwu częstotliwości", (krzywa A,B)

Fig. 10. Time characteristics of $\Theta = f(t)$; a) slot of stator windig, b) slot of rotor winding, under conventional load (curve N) and equivalent two-frequency load (curve A,B)



Rys. 11. Oscylogram napięcia (górný przebieg) i prądu stojana silnika indukcyjnego o mocy $P=3$ kW:

a) przy $\lambda = 0,24$ i $\chi = 0,91$, b) $\lambda = 0,2$ i $\chi = 0,81$

Fig. 11. Oscillograms of voltage (top diagram) and current (down diagram) wave forms of the induction motor of 3 kW during two-frequency operation for:

a) $\lambda = 0,24$ and $\chi = 0,91$, b) $\lambda = 0,2$ and $\chi = 0,81$

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Metoda sztucznego obciążenia, znana pod nazwą "dwa częstotliwości", pozwala na określenie stopnia nagrzewania silnika i wyznaczenia dopuszczalnych przyrostów temperatur uzwojeń, szczególnie w tych przypadkach, gdy istnieją trudności w zesprzęgleniu silnika z prądnicą obciążającą, np. w przypadku silników budowy pionowej. Jest ona również stosowana do obciążenia silników indukcyjnych większej mocy, gdyż dzięki niej wyposażenie stacji prób sprowadza się do zainstalowania tylko maszyny synchronicznej o odpowiednich parametrach znamionowych, zamiast różnorodnego układu maszyn i rezystorów obciążających, niezbędnych przy metodzie bezpośredniego obciążenia.

LITERATURA

- [1] Kron A.W.: Messungen an Asynchronmotoren bei bifrequenter Speisung, ETZ-A, Bd.94,1973,H.2,77 - 82
- [2] Wild W.: Bifrequente Speisung von Asynchronmaschinen, Archiv für

- Elektrotechnik, 58, 1976, ss. 339 - 347.
- [3] Meyer A: Erwärmungslauf von Asynchronmaschinen bei bifrequenter Speisung,, Bull. SEV/VSE,68,1977,14,16 Juli, ss. 703 - 709.
- [4] Meyer A. Lorenzen H.W.: Two - Frequency Heat Run - A Method of Examination for Three - Phase Induction Motors, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS - 98. No. 6.1979, ss. 2338 - 2347.
- [5] Myszor G. Stępień J.: Nagrzewanie maszyny indukcyjnej metodą sztucznego obciążenia. Praca dyplomowa - magisterska. Instytut Masz. i Urz. Elektr. Pol. Śl. w Gliwicach, 1987.

Recenzet: Doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994 r.

Abstract

The application of two voltages of different frequencies to the stator winding supply causes heating due to alternating motor - generator operation. When the rotor speed is smaller than the synchronous speed the machine acts as a motor and it acts as a generator when the rotor speed is greater than the synchronous speed. This method is known as the two-frequency method.

The operational performance of the three-phase induction motor fed with two frequencies is discussed. The aim of this paper is to present results of a conventional heat run in which the motor shaft is mechanically loaded and to compare them with the results obtained by the two-frequency method.

A small squirrel-cage three-phase induction motor is used as a test machine. The temperature is continuously measured in the stator and the rotor by means of thermocouples. The heat run is performed at two different auxiliary frequencies 35,5 Hz and 45,5 Hz. The average values of temperatures of the stator winding and the rotor are shown in fig. 10. A comparison of the results of the two-frequency (A,B) test and test with the mechanical loading (N) shows that temperature rise in respect to time is qualitatively the same. Quantitatively, the temperature recorded during the former method depends on the auxiliary frequency and is about 1 to 5% lower or higher than during the latter. Hence the two-frequency method is suitable for determining the temperature rise of the windings of induction motors and is a good substitute for the conventional method.