ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z.139 Nr kol.1247

Maciej CZAKAŃSKI

WYZNACZENIE ENERGII WYDZIELANEJ W ROZRUSZNIKU ELEKTROLITYCZNYM WŁĄCZONYM W OBWÓD WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO

Streszczenie. W artykule omówiono metodę wyznaczania prądu wirnika I_2 silnika indukcyjnego pierścieniowego na podstawie uzyskanych pomiarowo wartości prądu stojana I_1 i prędkości obrotowej n oraz danych znamionowych i parametrów schematu zastępczego badanego silnika. Metodę wykorzystano do obliczenia energii wydzielanej w rozruszniku elektrolitycznym silnika indukcyjnego zainstalowanego na walcarce ALONGATOR.

DETERMINATION OF ENERGY LOSSES IN ROTOR-ELECTROLYTIC STARTER OF WOUND-ROTOR INDUCTION MOTOR

Summary. The method of determining the rotor current I_2 of wound-rotor induction motor on the basis of: a) test-recorded values of stator current I_1 and rotational speed n, b) rated parameters, c) equivalent scheme values of a given motor has been described in the paper. This method was used in calculating the energy loss in rotor-electrolytic starter of induction motor drive in rolling-mill elongator.

РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ ВЫДЕЛЯЕМОЙ В ЭЛЕКТРОЛИТНОМ СТАРТЕРЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Резюме. В статье обсуждены методы определения тока ротора I_2 асинхронново двигателя на основе измерительно полученых стоимостей тока статора I_1 вращающей скорости n и номинальных параметров эквивалентной схемы исслэдуемого двигателя. Этот метод использовался для вычисления энергии выделяемой в электролитном стартере асинхронново двигателя.

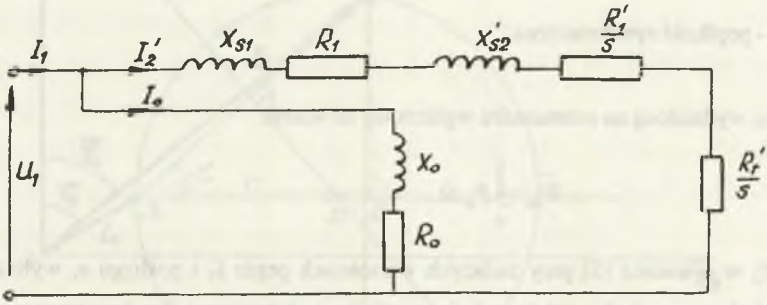
1. WSTĘP

Silniki indukcyjne pierścieniowe są stosowane jako napęd główny między innymi do napędu walcarki rur. W większości tych napędów, zwłaszcza starszego typu, silnik współpracuje z rezystorem elektrolitycznym włączonym na stałe w obwód wirnika. Rezystor ten spełnia funkcję rozrusznika i regulatora obrotów. Zmniejszenie zużycia energii tego typu napędu wiąże się z eliminacją strat energii w rezystorze elektrolitycznym, występujących w czasie regulacji prędkości obrotowej silnika. Planując modernizację napędu (np. poprzez instalację tyrystorowej kaskady asynchronicznej), należy najpierw określić całkowitą ilość energii wydzielanej w rezystorze (np. w ciągu roku) i przeprowadzić ocenę opłacalności przeprowadzenia takiej modernizacji. Występują jednak poważne trudności z określeniem energii wydzielanej w rezystorze elektrolitycznym z uwagi na małą oraz zmienną w czasie częstotliwość napięcia i prądu wirnika. W artykule przedstawiono metodę pośrednią określenia strat energii w rozruszniku. Metoda ta bazuje na pomiarze prądu stojana i prędkości obrotowej oraz wykresie kołowym silnika.

2. ALGORYTM I PROGRAM KOMPUTEROWY POZWALAJĄCE OBLICZYĆ ENERGIĘ WYDZIELANĄ W ROZRUSZNIKU NA PODSTAWIE ZAREJESTROWANYCH POMIARÓW PRĄDU STOJANA I PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WIRNIKA

Wartości prądu I_1 i prędkości obrotowej n silnika występujące w czasie pracy rejestruje się kolejno w pamięci rejestratora cyfrowego RCUF-1. Rejestrator ten dzięki zastosowanym przetwornikom A/C mierzy chwilowe wartości prądu i napięcia, uśrednia je i wartości uśrednione wpisuje do swojej pamięci wewnętrznej. Czas uśredniania można nastawiać w przedziale od 1 s do 15 min. Przy częstości zapisu co 1 s pojemność pamięci wystarcza na 8 h pracy rejestratora. Po podłączeniu rejestratora do komputera klasy IBM PC, wyniki pomiarów można zapisać w pamięci dyskowej i dowolnie opracowywać za pomocą własnych programów, np. stworzonego przez autora REJ_4K.EXE. Podstawą do opracowania algorytmu i programu są: schemat zastępczy silnika indukcyjnego przy U_1 = const i f_1 = const oraz jego wykres kołowy. Ponadto zakłada się prąd biegu jałowego silnika I_{1o} = const, co jest

równoznaczne z założeniem stałego nasycenia obwodu magnetycznego silnika i przyjęciem schematu zastępczego, w którym gałąź poprzeczna jest przełączona na zaciski zasilania [1]. Założenie to jest dopuszczalne, gdyż prąd I_1 w czasie pracy silnika na ogół nie przekracza $2I_{1N}$. Przyjęty schemat zastępczy przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego

Fig. 1. Equivalent scheme of induction motor

Algorytm obliczania energii wydzielanej w rozruszniku bazuje na bilansie mocy. Moc wydzielana w obwodzie wirnika silnika

$$P_{el}=m_1(R_2'+R_r')I_2'^2=P_{R2}+P_{Rr} \tag{1}$$

gdzie:

m_1 - liczba faz stojana,

P_{R2} - moc wydzielana na rezystancji R'_2 wirnika,

P_{Rr} - moc wydzielana na rozruszniku.

Moc elektryczna może być wyrażona również za pomocą mocy pola wirującego P_Ψ

$$P_{el}=P_\Psi s. \tag{2}$$

przy czym:

$$P_\Psi=m_2U_2'\ I_2'\cos\varphi_2. \tag{3}$$

Uwzględniając, że zgodnie z założeniami:

$$U_2'=U_1 \tag{4}$$

można określić moc strat w rozruszniku:

$$P_{Rr} = (m_1 U_1 I_2' \cos\varphi_2) s - m_1 R_2' I_2'^2 \tag{5}$$

przy czym poślizg:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{6}$$

gdzie: n_1 - prędkość synchroniczna.

Energię wydzieloną na rozruszniku wylicza się ze wzoru:

$$W_{roz} = \int_0^{\tau} P_{Rr} dt. \tag{7}$$

Prąd I'_2 w równaniu (5), przy zadanych wartościach prądu I_1 i poślizgu s, wylicza się z wykresu kołowego silnika. Wykres kołowy silnika indukcyjnego jest konstruowany przez program komputerowy. Wyznaczone zostają: promień okręgu oraz współrzędne punktu stanowiącego środek okręgu na płaszczyźnie zespolonej. Na wstępie wyznacza się punkty wykresu kołowego odpowiadające s = 0 i s = 1, przy $R_r = 0$, to znaczy na podstawie znanych wartości skutecznych prądów biegu jałowego I_{1o} i zwarcia I_z , oraz $\cos\varphi_o$ i $\cos\varphi_z$, wyznacza się na płaszczyźnie Gaussa położenie punktów s=0 i s=1. Punkty te oznaczono na rys. 2 odpowiednio przez A i B. W punktach tych leżą groty wektorów prądów, I_o i I_z,przy czym początki tych wektorów leżą w środku układu współrzędnych.

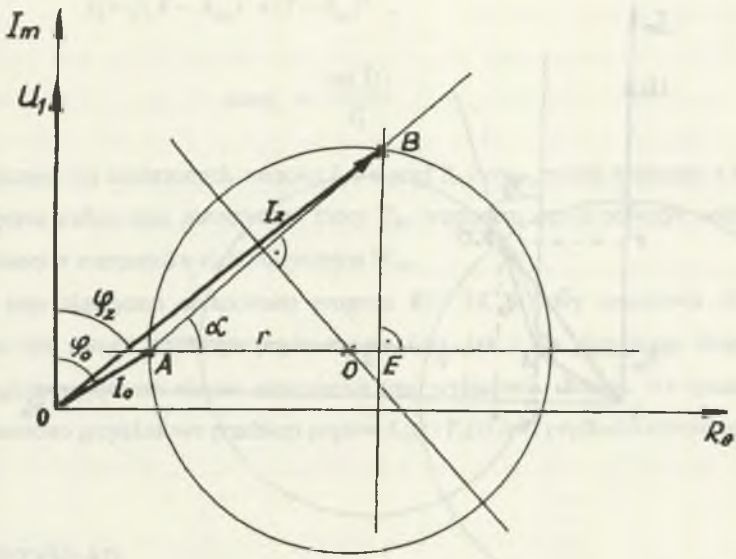
Współrzędne punktów A i B na osiach Re i Im uzyskano ze wzorów:

$$\begin{aligned} A_{\mathrm{Im}} &= I_o \cos\varphi_o , \\ A_{\mathrm{Re}} &= I_o \sin\varphi_o , \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} B_{\mathrm{Im}} &= I_z \cos\varphi_z , \\ B_{\mathrm{Re}} &= I_z \sin\varphi_z . \end{aligned} \tag{9}$$

Opierając się na współrzędnych punktów A i B komputer oblicza współrzędne punktu pomocniczego E oraz długości odcinków AB i AE zaznaczonych na rys. 2. Wyznaczony jest również cosinus kąta α zawartego między odcinkami AB i AE.

$$\cos\alpha = \frac{AE}{AB}, \tag{10}$$



Rys. 2. Konstrukcja wykresu kołowego silnika indukcyjnego

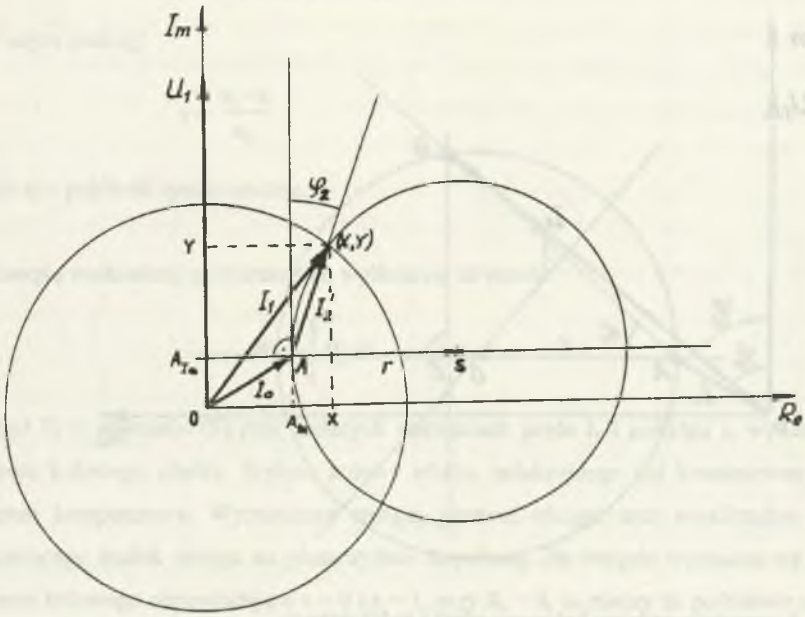
Fig. 2. Circle diagram of induction motor - construction

Zgodnie z zasadami konstruowania wykresu kołowego dla maszyn indukcyjnych pierścieniowych, środek okręgu S wyznacza punkt przecięcia linii prostopadłej do wskazu napięcia U_1 i przechodzącej przez koniec wektora $\bar{I}_o$, z symetralną odcinka AB. Z rys. 2 widać, że odcinek AS można wyznaczyć ze wzoru:

$$AB = \frac{\frac{AB}{2}}{\cos\alpha} = \frac{(AB)^2}{2AE} . \tag{11}$$

Stąd uzyskujemy promień koła: r = AS ,

oraz współrzędne punktu S: $S_{Im} = A_{Im}$, $S_{Re} \gg A_{Re} + r$.



Rys. 3. Określenie parametrów I_1 i I'_2 z wykresu kołowego silnika indukcyjnego

Fig. 3. Determination of currents I_1 i I'_2 from inductionmotor circle diagram

W celu obliczenia prądu I'_2 dla zadanej wartości prądu I_1 , na płaszczyźnie Gaussa (rys. 2) rysujemy drugi okrąg o promieniu $\bar{I}_1$ współśrodkowy z układem współrzędnych - rys. 3. Punkty przecięcia się tych dwóch okręgów wyznaczają równania:

$$\begin{aligned} &(X - S_{\mathrm{Re}})^2 + (Y - S_{\mathrm{Im}})^2 = r^2 \ , \\ &X^2 + Y^2 = I_1^2 \ . \end{aligned} \tag{12}$$

gdzie X i Y są współrzędnymi punktów przecięcia obu okręgów. Z dwóch uzyskanych par współrzędnych wybiera się te współrzędne, dla których Y>0, bowiem tylko dla takich współrzędnych występuje praca silnikowa. Znając położenia punktu początkowego i punktu końcowego wektorów prądu $\bar{I}_o$ *i* $\bar{I}_1$ możemy wyznaczyć wektor prądu $\bar{I}'_2$, jego wartość skuteczną I'_2 oraz $\cos\varphi_2$.

$$I_2' = \sqrt{(X - A_{Re})^2 + (Y - A_{Im})^2} \ , \tag{13}$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{\mathrm{Im}(\bar{I}_2')}{I_2'} \ . \tag{14}$$

Obliczając dla zmierzonych wartości I_1 i n prąd I'_2 i $\cos\varphi_2$ można następnie z równań (5) i (7) poprzez całkowanie numeryczne mocy P_{Rr} względem czasu obliczyć wartość energii wydzielanej w rozruszniku elektrolitycznym W_{roz}.

Dla tego algorytmu opracowano program REJ_4K_S, który umożliwia obliczanie W zarówno dla całego przebiegu prądu stojana $I_1(t)$, jak i dla dowolnego fragmentu tego przebiegu z wyjątkiem stanów awaryjnych (np. wyłączenia silnika). Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe przebiegi prądów $I_1(t)$ i $I'_2(t)$ oraz prędkości obrotowej n.

3. PRZYKŁAD

Za pomocą omówionej metody badano 15.V.1992 prąd obciążenia I_1 i prędkość obrotową silnika indukcyjnego zainstalowanego w napędzie walcarki ALONGATOR w jednej z hut. Na podstawie dostarczonych danych technicznych [2] oraz wyników wcześniejszych pomiarów badanego silnika otrzymano następujące wartości parametrów silnika i jego schematu zastępczego:

$U_1 = \frac{6000}{\sqrt{3}}$ V, $J = 2.857$, $I_z = 1422$ A,

$n_1 = 150$ obr/min, $R'_2 = R_2 J = 0.171$ W, $\cos j_o = 0.059$,

$R_1 = 0.15$ W, $X_{s1} = X'_{s2} = 1.204$ W, $\cos j_z = 0.129$,

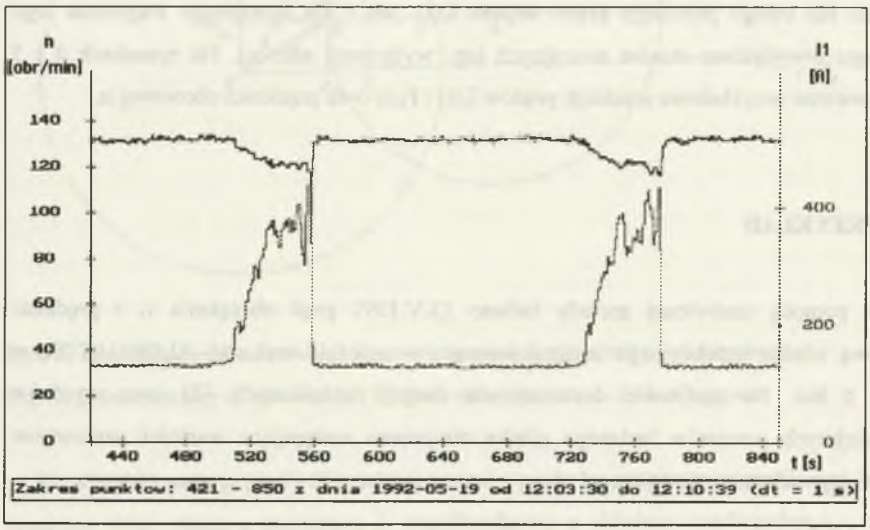
$R_2 = 0.06$ W, $I_0 = 120$ A, $m_1 = 3$.

Oparając się na zaprezentowanym algorytmie obliczono energię wydzielaną w rezystorze elektrolitycznym w różnych stanach obciążenia silnika:

- przy walcowaniu rur o średnicy F457 mm w czasie jednej godziny wydziela się łączna energia: $W_{roz} = 54151$ W·h,
- przy walcowaniu jednej rury F457 (przedział czasu t =48 ¸ 51s - rys. 5) wydziela się energia: $W_{roz} = 3461$ ¸ 3549 W·h,

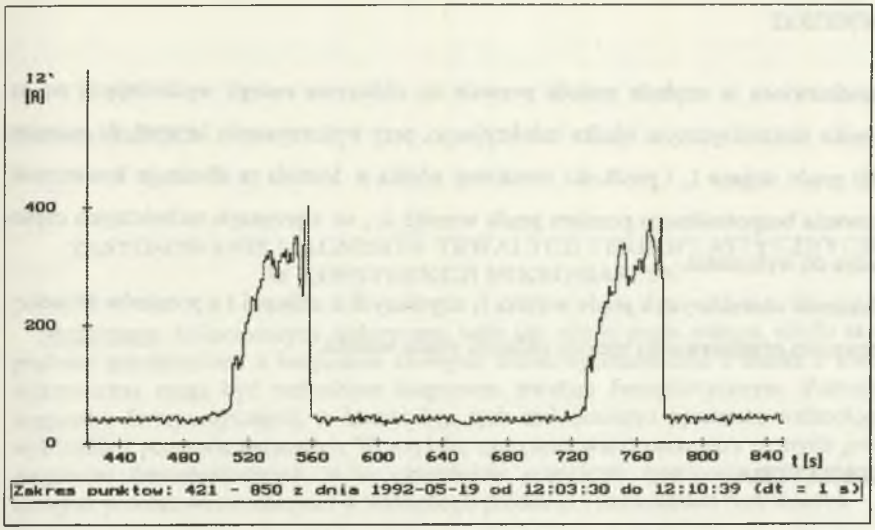
- w czasie biegu jałowego silnika między poszczególnymi walcowaniami w czasie 48 s wydziela się energia: $W_{roz} = 210$ W·h.

W maju 1993 r. dokonano ponownych pomiarów tego samego silnika przy częściowo zmienionych warunkach eksploatacyjnych (rozrusznik elektrolityczny zwarty, wyższe średnice rur: F508 mm), mierząc również za pomocą specjalnego przetwornika prąd wirnika I_2. Ze względu na wprowadzone zmiany porównywanie wydzielonej energii jest niemożliwe. Jednak porównując rząd wartości i kształt charakterystyk prądu I_2 uzyskanych podczas obu sesji pomiarowych można zauważyć ich zbieżność (rys. 6).



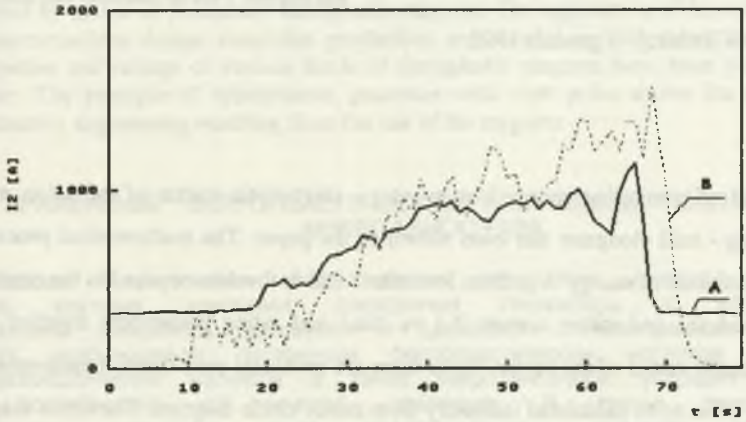
Rys. 4. Zarejestrowany przebieg prądu stojana I_1 oraz prędkości wirnika n silnika indukcyjego

Fig. 4. The recorded course of stator current I_1 and rotor speed of induction motor



Rys. 5. Obliczony przebieg prądu wirnika I'_2 silnika indukcyjnego

Fig. 5. The calculated course of rotor current I'_2 of induction motor



Rys. 6. Przebieg prądu wirnika I silnika indukcyjnego: A - Obliczony dla rury o średnicy F457 mm. B - Zarejestrowany dla rury o średnicy F508 mm

Fig. 6. The course of rotor current I of induction motor: A - calculated for rolled tube F457 mm, B - recorded for rolled tube F508 mm

4. WNIOSKI

Przedstawiona w artykule metoda pozwala na obliczenie energii wydzielającej się na rozruszniku elektrolitycznym silnika indukcyjnego, przy wykorzystaniu łatwych do pomiaru wartości prądu stojana I_1 i prędkości obrotowej silnika n. Metoda ta eliminuje konieczność dokonywania bezpośredniego pomiaru prądu wirnika I_2 , co z przyczyn technicznych często jest trudne do wykonania.

Zbieżność charakterystyk prądu wirnika I_2 uzyskanych z obliczeń i z pomiarów świadczy o poprawności przedstawionej metody obliczeń prądu wirnika.

LITERATURA

1. Plamitzer A.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1982.
2. Protokół 845/64 z pomiarów elektrycznych silnika indukcyjnego do napędu walcarki w hucie Batory. Gliwice 1964.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Jan Zawilak

Wpłynęło do Redakcji 1 grudnia 1993

Abstract

The method of computing energy loss in rotor - electrolytic starter of induction motor drive of rolling - mill elongator has been shown in the paper. The mathematical procedure allows the calculation of energy W_{roz} from formulas 7 and 5; the data required is the course of rotational speed (n) and stator current (I_1) vs. time and rating parameters together with equivalent scheme values of the motor. Since there are problems with direct measurement of rotor current, it has to be calculated indirectly from motor circle diagram. The circle diagram is constructed by the computer (Figs. 2 & 3). All the calculations have been done with the help of computer program REJ_4K.EXE. This program makes possible the selection of a fragment of previously recorded measurement data. On this basis the energy loss can be calculated. The method described above has been tested in rolling - mill in Huta Batory Steel Plant in Chorzów.