

Jan Mróz  
Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

## ROZRUCH SILNIKA GŁĘBOKOŻŁOBKOWEGO W UKŁADZIE ŁAGODNEGO ROZRUCHU – ASPEKT ENERGETYCZNY

### START-UP OF THE DEEP-BAR MOTOR WITH THE USE OF THE SOFT START-UP- AN ENERGETISTIC FACE

**Abstract:** During the soft start-up of the induction motor, various negative phenomena connected with considerable heat emissions in the motor's winding are observed. They may, particularly in the case of the prolonged start-up, result in a damage to the squirrel – cage winding. What is more, torque impulses may be harmful to the elements of the driving system. The article discusses the use of the soft start-up and indicates that it helps to minimize only some of the negative phenomena. There are cases in which the soft start – up proves to be an additional risk to the motor. The distribution of the energy emitted in particular elements of the motor's winding has been calculated, both during the start-up with the use of the soft start-up and during the direct on-line start-up, in the deep-bar 320 kW motor. There are giving laboratory tests: time-current, speed, torque and temperature rise of the rotor's bar in the low-power induction motor during start-up.

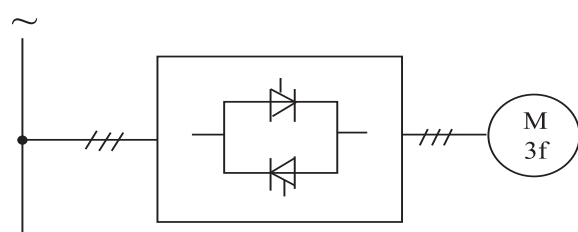
#### 1. Wstęp

Rozruch silnika indukcyjnego klatkowego przez bezpośrednie załączenie znamionowego napięcia jest często stosowany, jednak narażenia uzwojenia klatkowego wirnika wywołane działaniem termicznym i elektrodynamicznym prądów rozruchowych są tutaj największe [6]. Szczególnego znaczenia nabierają te zjawiska w czasie długotrwałego rozruchu [1]. Wydzielenie się w uzwojeniu wirnika nadmiernej ilości energii w czasie rozruchu może doprowadzić do uszkodzenia konstrukcji klatki na skutek przekroczenia dopuszczalnych naprężeń mechanicznych pochodzenia cieplnego. Duży prąd rozruchowy może także wywołać zakłócenia w sieci zasilającej. Udary momentu mogą być groźne dla elementów układu napędowego. Ograniczenie niektórych z wymienionych, niekorzystnych zjawisk, jest możliwe przez zastosowanie układu łagodnego rozruchu. W niniejszej pracy rozpatrzono energetyczne aspekty rozruchu silnika indukcyjnego klatkowego w układzie łagodnego rozruchu oraz przy rozruchu bezpośrednim.

#### 2. Układ łagodnego rozruchu

Na rysunku 1 przedstawiono silnik indukcyjny zasilany w układzie umożliwiającym łagodny rozruch (softstart), zrealizowanym za pomocą łącznika tyrystorowego. Napięcie międzyfazowe zasilania silnika jest regulowane w sposób ciągły przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów. Układ tego typu może realizować następujące funkcje:

- łącznika bezstykowego: do załączenia silnika,
- rozrusznika: do łagodnego rozruchu,
- regulatora napięcia podczas pracy ustalonej silnika: wobec istotnych wad [5, 7] (pobór mocy biernej przesunięcia fazowego i mocy deformacji, zmniejszenie współczynnika mocy ze wzrostem kąta załączenia, niesymetria prądów i napięć zasilania silnika) – ta funkcja w przedstawionym układzie łącznika ma małą przydatność praktyczną.



Rys. 1. Silnik indukcyjny zasilany w układzie łącznika tyrystorowego

Uwzględniając tylko podstawową harmoniczną napięcia przyjęto, że w układzie łagodnego rozruchu skuteczna wartość napięcia zasilającego w czasie rozruchu wyraża się zależnością:

$$U(t) = \begin{cases} U_N \left[ (1 - k_z U) \frac{t}{t_{nU}} + k_z U \right] & \text{dla } 0 \leq t \leq t_{nU} \\ U_N & \text{dla } t > t_{nU} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:  $k_{zU}$  – współczynnik zmniejszenia napięcia,  $t_{nU}$  – czas narastania napięcia.

### 3. Energia w uzwojeniu wirnika w czasie rozruchu w układzie łagodnego rozruchu

W celu jakościowego prześledzenia zależności energetycznych w uzwojeniu wirnika chwilowo przyjmuje się założenie, że proces rozruchu ma charakter quasi-ustalony. Wtedy, energia wydzielona w uzwojeniu wirnika podczas rozruchu wyraża się zależnością:

$$W_r = \int_0^{t_R} P_r dt = \int_0^{t_R} P_i s dt = \int_0^{t_R} \frac{\omega_s}{p} T_e s dt \quad (2)$$

gdzie:  $t_R$  – czas rozruchu,  $s$  – poślizg,  $P_r$ ,  $P_i$  – moc wydzielona w uzwojeniu wirnika, moc pola wirującego,  $T_e$  – moment,  $\omega_s$  – pulsacja pola stojana,  $p$  – liczba par biegunów. Uwzględniając w zależności (2):

$$T_e = J \frac{d\Omega_m}{dt} + T_s \quad (3)$$

gdzie:  $T_s$  – moment obciążenia,  $J$  – moment bezwładności,  $\Omega_m$  – mechaniczna prędkość kątowna wirnika, otrzymuje się:

$$W_r = \frac{1}{2} J \left( \frac{\omega_s}{p} \right)^2 (s_1^2 - s_2^2) + \int_0^{t_R} T_s \left( \frac{\omega_s}{p} - \Omega_m \right) dt \quad (4)$$

gdzie:  $s_1$  – poślizg początkowy ( $s_1 = 1$ ),  $s_2$  – poślizg w stanie ustalonym. Gdy w czasie rozruchu wystąpi sytuacja, w której moment obciążenia nie odgrywa roli ( $T_s = 0$ ) oraz  $s_2 \approx 0$ , energia wydzielona w uzwojeniu wirnika, na podstawie zależności (4), wynosi:

$$W_r = \frac{1}{2} J \left( \frac{\omega_s}{p} \right)^2 \quad (5)$$

Jest ona równa energii kinetycznej mas wirujących z prędkością kątową synchroniczną  $\omega_s/p$ . Niezależnie więc od tego, czy rozruch odbywa się przez bezpośrednie załączenie na pełne napięcie czy w układzie łagodnego rozruchu, energia wydzielona w wirniku musi być taka sama. W efekcie pole temperatury silnika po zakończeniu rozruchu w obu wypadkach musi być podobne. Gdy rozruch odbywa się z dużym momentem obciążenia, drugi składnik w zależności (4) ma większą wartość przy rozruchu w układzie łagodnego rozruchu, gdyż rozruch trwa tu znacznie dłużej. Wydzieli się w tym wy-

padku więcej energii w wirniku niż przy rozruchu bezpośrednim. Należy się spodziewać raczej większej temperatury uzwojeń.

### 4. Określenie prądów w uzwojeniach silnika w czasie rozruchu

Rozruch silnika jest nieustalonym stanem elektromechanicznym i w celu określenia ilościowych zależności energetycznych w uzwojeniu wirnika zostały przeprowadzone obliczenia z uwzględnieniem tego faktu. Rozpatrywany będzie silnik indukcyjny głębokożłobkowy z prostokątnym przekrojem pręta klatki. Uproszczenie opisu rozkładu pola elektromagnetycznego i rozkładu gęstości prądu w przekroju pręta możliwe jest poprzez podział pręta wzdłuż jego wysokości na przewody elementarne. Transformując układ równań opisujących nieustalony stan elektromechaniczny silnika ze współrzędnych naturalnych do układu dwufazowego wirującego z prędkością  $\omega_x$  otrzymujemy [4]:

$$\mathbf{U} = \frac{d}{dt} \mathbf{\Psi} + \mathbf{\Omega} \mathbf{\Psi} + \mathbf{R} \mathbf{I} \quad (6)$$

$$\mathbf{\Psi} = \mathbf{L} \mathbf{I} \quad (7)$$

gdzie:  $\mathbf{U} = [0, 0, \dots, 0, \underline{U}_s]^T$ ,

$$\mathbf{I} = [\underline{I}_{r(1)}, \underline{I}_{r(2)}, \dots, \underline{I}_{r(n)}, \underline{I}_s]^T$$

$$\mathbf{\Psi} = [\underline{\Psi}_{r(1)}, \underline{\Psi}_{r(2)}, \dots, \underline{\Psi}_{r(n)}, \underline{\Psi}_s]^T,$$

$$\mathbf{\Omega} = \text{diag}[j(\omega_x - \omega_r), j(\omega_x - \omega_r), \dots, j(\omega_x - \omega_r), j\omega_x],$$

$\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{L}$  – macierze rezystancji, indukcyjności [4]. Indeks  $s$  dotyczy stojana, indeks  $r$  – wirnika. Równanie momentów ma postać:

$$J \frac{1}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = p \text{Re}(j \underline{\Psi}_s \underline{I}_s^*) + T_s(\omega), \quad (8)$$

a równanie kąta przemieszczenia wirnika:

$$\frac{d\vartheta_r}{dt} = \omega_x - \omega_r \quad (9)$$

Po wyznaczeniu wektora  $\mathbf{I}$  z układu równań (6), (7), (8), (9) można obliczyć rzeczywiste przebiegi prądów płynących w uzwojeniach silnika [4]. Ich znajomość pozwoli na obliczenie energii wydzielanej w uzwojeniach w czasie rozruchu.

### 5. Określenie energii wydzielonej w uzwojeniach silnika

Energia wydzielona w uzwojeniach stojana:

$$W_s = 3R_s \int_0^{t_R} i_s^2(t) dt \quad (10)$$

$R_s$  – rezystancja fazowa uzwojenia stojana,  $i_s$  – prąd stojana. Energia wydzielona we wszystkich prętach klatki wirnika:

$$W_b = N_r R_b \int_0^{t_R} i_b^2(t) dt \quad (11)$$

$R_b$  – rezystancja pręta klatki,  $i_b$  – prąd pręta klatki. Energia pręta wydzielona w warstwie  $i$ :

$$W_{b(i)} = R_b n \int_0^{t_R} i_{b(i)}^2(t) dt \quad (12)$$

$i_{b(i)}$  – prąd w  $i$ -tej warstwie pręta,  $n$  – ilość przewodów elementarnych w przecie. Całkowita energia wydzielona w uzwojeniu wirnika silnika w czasie rozruchu:

$$W_r = W_b + W_{er} \quad (13)$$

gdzie  $W_{er}$  – energia w pierścieniach zwierających. Powyższe zależności na energię wydzielaną w poszczególnych uzwojeniach i ich elementach są słuszne przy pominięciu wpływu temperatury na rezystancję uzwojenia.

## 6. Wyniki obliczeń

W praktyce istotne narażenia silnika w czasie rozruchu mają miejsce, gdy:

- w układzie napędowym występuje jedynie duży moment bezwładności (moment obciążenia nie ma istotnego wpływu na przebieg rozruchu),
- w układzie napędowym występuje duży moment bezwładności oraz duży moment obciążenia,
- następuje próba rozruchu z awaryjnie zablokowanym wirnikiem.

Obliczenie energii wydzielonej w uzwojeniach silnika dla powyższych przypadków dotyczą silnika indukcyjnego głębokoźłobkowego o danych:  $P_N=320$  kW,  $U_N=6000$  V przy połączeniu w gwiazdę,  $p=3$ . Zarówno pręty klatki jak i pierścienie zwierające wykonane są z miedzi. Wymiary pręta klatki:  $b=0.005$  m,  $h=0.062$  m. Żłobek stojana prostokątny otwarty. Uzwojenie stojana dwuwarstwowe o liczbie zwojów na fazę  $z_s=240$ . Liczba żłobków stojana  $N_s=72$ , liczba żłobków wirnika  $N_r=58$ . Idealna długość silnika  $l_r=0.56$  m. Oznaczając przez  $W_r^S$  całkowitą energię wydzieloną w uzwojeniach wirnika w czasie rozruchu w układzie łagodnego rozruchu oraz przez  $W_r^D$  przy rozruchu bezpośrednim, w przypadku rozruchu bez momentu obciążenia, otrzymujemy:

$$\left. \frac{W_r^S}{W_r^D} \right|_{T_s=0} = 0,970$$

Podobnie, dla uzwojenia stojana:

$$\left. \frac{W_s^S}{W_s^D} \right|_{T_s=0} = 0,972$$

oraz dla obu uzwojeń silnika:

$$\left. \frac{W^S}{W^D} \right|_{T_s=0} = 0,971$$

Widać, że zgodnie z (5) w przypadku rozruchu bez momentu obciążenia energia całkowita wydzielona w uzwojeniach silnika nie zależy od sposobu rozruchu. Należy się więc spodziewać podobnych wartości temperatury uzwojeń. Różnice będą wynikać z warunków wymiany ciepła zmienionych różnymi czasami rozruchów. W przypadku rozruch z momentem obciążenia mamy:

$$\left. \frac{W_r^S}{W_r^D} \right|_{T_s \neq 0} = 1,677; \quad \left. \frac{W_s^S}{W_s^D} \right|_{T_s \neq 0} = 1,571$$

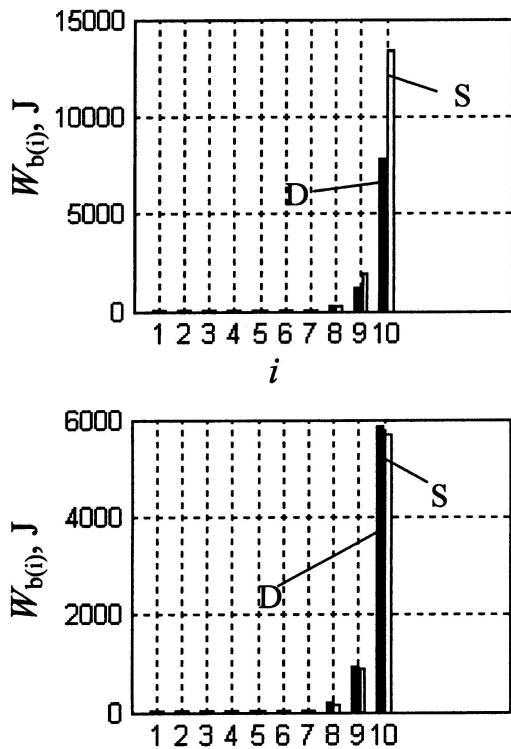
$$\left. \frac{W^S}{W^D} \right|_{T_s \neq 0} = 1,642$$

Tutaj energia wydzielona w uzwojeniach wirnika silnika w czasie rozruchu w układzie łagodnego rozruchu jest znacznie większa (o około 68 %) niż w czasie rozruchu bezpośredniego. W przypadku próby rozruchu z awaryjnie zablokowanym wirnikiem mamy:

$$\left. \frac{W_r^S}{W_r^D} \right|_{Blok} = 0,582; \quad \left. \frac{W_s^S}{W_s^D} \right|_{Blok} = 0,583$$

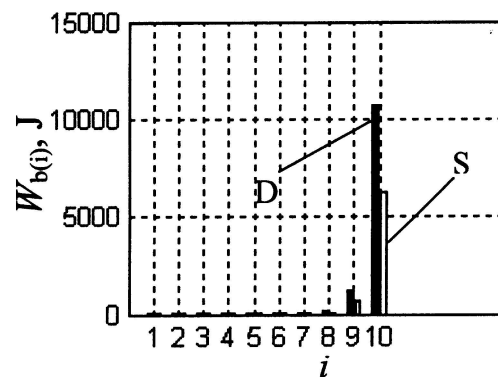
$$\left. \frac{W^S}{W^D} \right|_{Blok} = 0,582$$

Energia wydzielona w uzwojeniach silnika przy próbie rozruchu z zablokowanym wirnikiem jest znacznie mniejsza (o około 42 %), gdy ta próba odbywa się w układzie łagodnego rozruchu. Wyniki obliczeń energii wydzielonej w poszczególnych przewodach elementarnych pręta klatki przedstawia rysunek 2 dla przypadku rozruchu z momentem obciążenia (u góry) i bez momentu obciążenia (u dołu), gdzie S – wyniki dla rozruchu w układzie łagodnego rozruchu, D – wyniki dla rozruchu bezpośredniego.



Rys. 2. Energia wydzielona w poszczególnych przewodach elementarnych pręta klatki przy rozruchu z momentem obciążenia (u góry) i bez momentu obciążenia, D – rozruch bezpośredni, S – rozruch w układzie łagodnego rozruchu

Z rysunku 2 wynika, że przy rozruchu bez momentu obciążenia sposób rozruchu nie ma praktycznie wpływu ani na ilość wydzielonej w wirniku energii, ani na jej rozkład w pręcie uzwojenia klatkowego. W obu przypadkach rozruchu najwięcej energii wydzielili się w górnych warstwach pręta. Jednak w przypadku rozruchu w układzie łagodnego rozruchu z momentem obciążenia wydzielili się tej energii znacznie więcej niż przy rozruchu bezpośrednim, a różnice energii są stosunkowo duże, szczególnie w górnych warstwach pręta. Może to być przyczyną nadmiernego wzrostu temperatury tych miejsc i powstania szkodliwych naprężeń mechanicznych mogących być przyczyną uszkodzenia uzwojenia klatkowego. Wyniki obliczeń energii wydzielonej w poszczególnych przewodach elementarnych pręta klatki dla próby rozruchu z awaryjnie zablokowanym wirnikiem przedstawia rysunek 3. Tutaj, odwrotnie niż poprzednio, w górnych warstwach pręta wydzielili się mniej energii przy próbie rozruchu w układzie łagodnego rozruchu, gdyż początkowe napięcie zasilania silnika jest znacznie mniejsze i w uzwojeniach płyną prądy o mniejszym natężeniu.

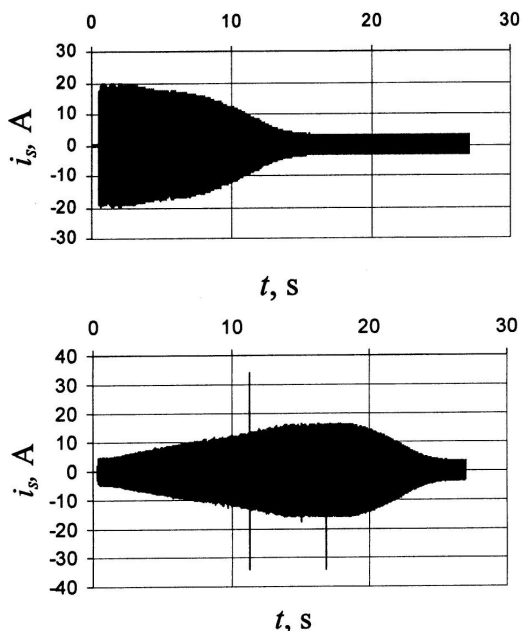


Rys. 3. Energia wydzielona w poszczególnych przewodach elementarnych pręta klatki przy próbie rozruchu z awaryjnie zablokowanym wirnikiem, D – rozruch bezpośredni, S – rozruch w układzie łagodnego rozruchu

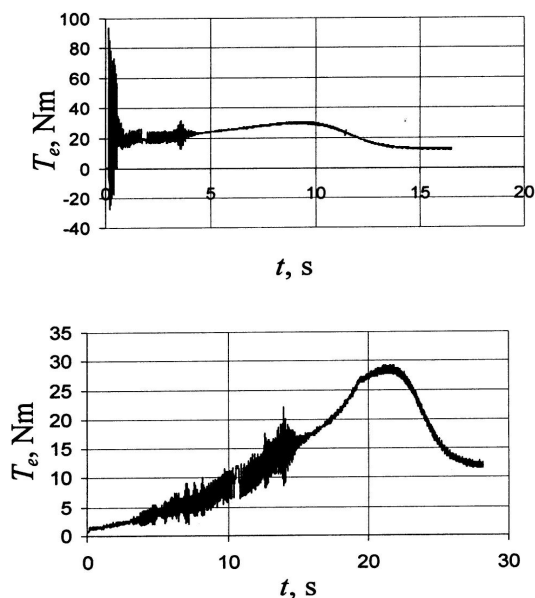
Przeprowadzenie pomiarów temperatury uzwojenia klatkowego w czasie rozruchu silnika dużej mocy nie jest możliwe w warunkach laboratoryjnych. Dlatego, w celu potwierdzenia jakościowego (a nie ilościowego) charakteru wyników obliczeń, wykonano laboratoryjne badania rozruchu silnika indukcyjnego jednoklatkowego małej mocy. Przedmiotem badań był silnik Typ Sg112M4 o mocy 4 kW i prędkości 1445 1/min. Rozruch bezpośredni przeprowadzono poprzez załączenie silnika bezpośrednio do sieci zasilającej mierząc temperaturę pręta klatki. Rozruch łagodny przeprowadzono zasilając silnik z układu łagodnego rozruchu ELVOSTART SAO 400/4. Silnik obciążony był prądnicą prądu stałego, której energia przekazywana jest poprzez falownik do sieci zasilającej silnik. Na wale prądnicy zamocowano dodatkowy moment bezwładności  $J=89 J_N$ , gdzie  $J_N$  - naturalny moment bezwładności silnika. Do pomiaru momentu zastosowano czujnik momentu Mi 10 współpracujący z miernikiem momentu ALFA 1006 firmy SENSOR –AT. Temperaturę pręta klatki wirnika mierzono przy pomocy termoelementu CuKo zagniecionego w materiale pręta w strefie pakietowej klatki w przyszczelinowej części żłobka. Mierzone sygnały rejestrowano kartą pomiarową AX5210 firmy AXIOM współpracującą z oprogramowaniem NOTEBOOK PRO firmy LABTECH. Rozruch bezpośredni przeprowadzono poprzez załączenie silnika bezpośrednio do sieci zasilającej mierząc prąd stojana, moment, prędkość i temperaturę pręta klatki. Rozruch łagodny przeprowadzono zasilając

silnik z układu łagodnego rozruchu ELVOSTART SAO 400/4.

Na rysunku 4 przedstawiono zmierzony przebieg prądu stojana silnika w czasie rozruchu bezpośredniego (u góry), łagodnego (u dołu)



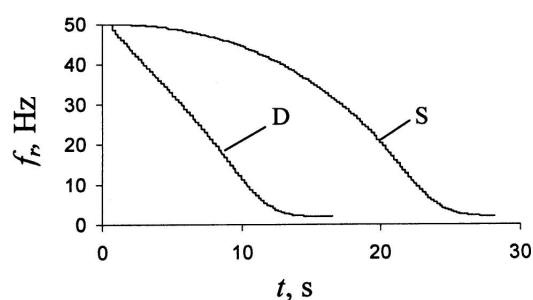
Rys. 4. Zmierzony przebieg prądu stojana podczas rozruchu badanego silnika: rozruch bezpośredni (u góry), rozruch w układzie łagodnego rozruchu (u dołu)



Rys. 5. Zmierzony przebieg momentu w czasie rozruchu badanego silnika: rozruch bezpośredni (u góry), rozruch w układzie łagodnego rozruchu (u dołu)

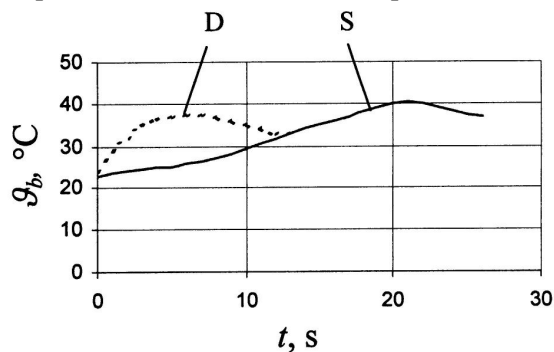
Widać, że poprzez zastosowanie układu łagodnego rozruchu znacznie ogranicza się nie-

korzystne działanie prądu rozruchowego na sieć zasilającą oraz zmniejsza narażenia maszyny związane z elektrodynamicznym oddziaływaniem prądu w uzwojeniach. Wyniki pomiarów przedstawionych na rysunku 5 wykazują, że zastosowanie rozruchu łagodnego znacząco ogranicza udary momentu na początku rozruchu, które mogą być szkodliwe dla układu napędowego. Praktycznie nie pogarsza się przeciążalność silnika. Dochodzi jednak do znacznego zmniejszenia początkowego momentu rozruchowego, co znacząco wydłuża czas rozruchu w porównaniu do rozruchu bezpośredniego.



Rys. 6. Obliczony na podstawie zmierzonej prędkości przebieg częstotliwości prądu wirnika w czasie rozruchu badanego silnika (D – rozruch bezpośredni, S – rozruch w układzie łagodnego rozruchu)

Z rysunku 6 wynika, że w czasie rozruchu w układzie łagodnego rozruchu przez długi okres rozruchu utrzymuje się w wirniku duża wartość częstotliwości (wolno narasta prędkość w porównaniu z rozruchem bezpośrednim) i prąd pręta musi być silnie wypierany do górnych warstw co prowadzi do ich silnego nagrzania. W efekcie pole temperatury w przekroju pręta klatki będzie tu bardziej nierównomierne. Wystąpią większe odkształcenia i naprężenia.



Rys. 7. Zmierzona temperatura pręta klatki wirnika w czasie rozruchu badanego silnika (D – rozruch bezpośredni, S – rozruch w układzie łagodnego rozruchu)

Na rysunku 7 przedstawiono nagrzewanie pręta klatki silnika w czasie 2 sposobów rozruchu. Większa temperatura prętów klatki silnika występuje w układzie łagodnego rozruchu. W przypadku silników dużej mocy różnice temperatury będą znacznie większe zwłaszcza dla przyszczelinowych warstw pręta, gdyż wskutek silnego wypierania prądu wydzieli się tam najwięcej energii.

## 7. Wnioski

Do obliczenia energii wydzielanej w uzwojeniach silnika w czasie rozruchu w układzie łagodnego rozruchu uwzględniono tylko podstawową harmoniczną napięcia. Zastosowanie układu łagodnego rozruchu znacznie zmniejsza narażenie maszyny związane z elektrodynamicznym oddziaływaniem prądu rozruchowego. Należy jednak podkreślić, że podczas rozruchu ze statycznym momentem obciążenia w układzie łagodnego rozruchu w klatkowym uzwojeniu wirnika wydzieli się znacznie więcej energii niż podczas rozruchu bezpośredniego (temperatura pręta klatki będzie znacznie wyższa). Układ łagodnego rozruchu nie powoduje więc zmniejszenia efektów termicznych zachodzących w silniku podczas rozruchu z momentem obciążenia, które mają decydujący wpływ na trwałość klatki silnika. Także w czasie rozruchu bez momentu obciążenia układ łagodnego rozruchu nie chroni silnika przed narażeniami termicznymi, gdyż wskutek wydzielenia się w wirniku takiej samej ilości energii temperatura uzwojenia klatki jest prawie taka jak podczas rozruchu bezpośredniego. Gdy rozruch nie jest możliwy wskutek zablokowania wirnika, ilość energii w wirniku zależy od napięcia zasilania, które w układzie łagodnego rozruchu jest na początku rozruchu znacznie mniejsze niż przy rozruchu bezpośrednim. Oznacza to, że w uzwojeniu wirnika silnika z zablokowanym wirnikiem, zasilanego w układzie łagodnego rozruchu, wydzieli się w tym samym czasie mniej ciepła. Zastosowanie układu łagodnego rozruchu jest ograniczone znacznym zmniejszeniem początkowego momentu rozruchowego. W wypadku napędów z dużymi momentami bezwładności dochodzi do znacznego wydłużenia czasu rozruchu. Istotne znaczenie ma więc stosowanie konstrukcji klatek wirników zapewniających duży początkowy moment rozruchowy – silników dwuklatkowych i głębokożłobkowych, gdzie zjawiska dylatacji

termicznych są szczególnie groźne. Silniki pracujące w układzie łagodnego rozruchu muszą być tak projektowane, aby były odporne na termiczne działania prądów rozruchowych nie mniej niż silniki przeznaczone do bezpośredniego rozruchu [2, 3]. Uzyskane rezultaty wskazują na szczególną potrzebę analizy zaobserwowanych zjawisk w odniesieniu do silników większej mocy w warunkach długotrwałego rozruchu prowadzonego różnymi metodami gdzie efekty termiczne towarzyszące rozruchowi mają duże znaczenie.

## 8. Literatura

- [1]. Chan C.C., Lietong Yan, Pizhang Chen, Zezong Wang, Chau K. T.: *Analysis of electromagnetic and thermal fields for induction motors during starting*. IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-9(1), 1994, s. 53-60.
- [2]. Mróz J.: *Termiczne uwarunkowania nowoczesnych metod rozruchu silników indukcyjnych klatkowych*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, BOBRME KOMEL, nr 61, 2000, s. 133-136.
- [3]. Mróz J., Rut R., Schab R.: *Wpływ różnych sposobów rozruchu silnika indukcyjnego na warunki pracy uzwojenia klatkowego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 5, 2000, s. 124-126.
- [4]. Paszek W.: *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa 1986.
- [5]. Piechota P.: *SOFTSTARTY – układy łagodnego rozruchu dla asynchronicznych silników klatkowych AC – cz. II*. Napędy i Sterowanie, nr 10, 2000, s. 28-29.
- [6]. Rut R.: *Stan naprężeń i przemieszczeń głębokożłobkowego prostokątnego pręta uzwojenia wirnika indukcyjnego silnika klatkowego wywołany działaniem cieplnym składowej ustalonej prądu zwarcia*. Archiwum Elektrotechniki, z. 1-4, 1989, s. 75-88.
- [7]. Tunia H., Winiarski B.: *Energoelektronika*. WNT, Warszawa 1994.

## Autor

dr inż. Jan Mróz  
 jamroz@prz.rzeszow.pl  
 Politechnika Rzeszowska,  
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki,  
 Katedra Elektrodynamiki i Układów Elektromaszynowych