

Jan Mróz

Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

ENERGIA WYDZIELONA W UZWOJENIACH SILNIKA INDUKCYJNEGO PODCZAS ROZRUCHU W UKŁADZIE ŁAGODNEGO ROZRUCHU

ENERGY EMITTED IN THE INDUCTION MOTOR'S WINDING DURING THE START-UP WITH THE USE OF THE SOFT START-UP

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. For the purpose of the illustration of the analysis, the temperature of the rotor's winding in the low-power induction motor under the discussed operating conditions has been altered.

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]. Wydzielanie 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

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

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

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

3. Zależności energetyczne w wirniku, 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:

$$W_T = \int_0^{t_R} P_T dt = \int_0^{t_R} P_1 s dt = \int_0^{t_R} \frac{\omega_s}{p} T_e s dt \quad (2)$$

gdzie: t_R – czas rozruchu, s – poślizg, P_T , P_1 – moc wydzielona w uzwojeniu wirnika, moc pola wirującego, T_e – moment, ω_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, Ω_m – mechaniczna prędkość kątowna wirnika, otrzymuje się:

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

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:

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

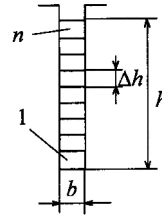
Jest ona równa energii kinetycznej mas wirujących z prędkością kątową synchroniczną ω_s/p . Niezależnie więc od tego, czy rozruch odbywa się przez bezpośrednie załączenie na pełne napięcie czy w układzie łagodnego rozruchu, energia wydzielona w wirniku musi być taka sama. W efekcie pole temperatury silnika 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 wypadku 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 (rys. 1). Można przyjąć, że w ramach przewodu elementarnego gęstość prądu w jego przekroju jest jednorodna.

Transformując układ równań opisujących nieustalony stan elektromechaniczny silnika ze współrzędnych naturalnych do układu dwufa-

zowego wirującego z prędkością ω_x otrzymujemy [4]:



Rys. 1. Podział pręta klatki na przewody elementarne

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

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

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. Dla silnika zasilanego symetrycznym układem napięć trójfazowych przy zerowej fazie początkowej mamy:

$$\underline{U}_s = \sqrt{3} U_{ph} e^{j(\omega_s - \omega_x)t} \quad (8)$$

gdzie: U_{ph} – wartość skuteczna napięcia fazowego zasilania silnika. Równanie momentów ma postać:

$$J \frac{1}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = p \text{Re}(j \underline{\Psi}_s \underline{I}_s^*) + T_s(\omega), \quad (9)$$

a równanie kąta przemieszczenia wirnika:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_x - \omega_r \quad (10)$$

Po wyznaczeniu wektora \mathbf{I} z układu równań (6), (7), (9), (10) można obliczyć prąd j -tego pręta z zależności:

$$i_b^{(j)} = i_r^{(j-1)} - i_r^{(j)}, \quad i_r^{(0)} = i_r^{(N_r)} \quad (11)$$

N_r – ilość prętów wirnika, przy czym:

$$i_r^{(j)} = \sqrt{\frac{2}{N_r}} \text{Re} \left(\underline{I}_r e^{j\theta_r^{(j)}} \right) \quad (12)$$

Prąd wyrażony zależnością (12) jest równocześnie prądem segmentu pierścienia zwierającego tworzącego wraz z prętami o numerach j oraz $j+1$ rozpatrywane oczko klatki, przy czym:

$$\underline{I}_r = \underline{I}_{r(1)} + \underline{I}_{r(2)} + \dots + \underline{I}_{r(n)} \quad (13)$$

$$\vartheta_r^{(j)} = \vartheta_r - \frac{2\pi}{N_r}(j-1) \quad (14)$$

$j=1, 2, \dots, N_r$. Podobnie, prąd i -tej warstwy, w przecię o numerze j , wynosi:

$$i_{b(i)}^{(j)} = i_{r(i)}^{(j-1)} - i_{r(i)}^{(j)} \quad (15)$$

przy czym:

$$i_{r(i)}^{(j)} = \sqrt{\frac{2}{N_r}} \operatorname{Re} \left(\underline{I}_{r(i)} e^{j\vartheta_r^{(j)}} \right) \quad (16)$$

Prąd fazy pierwszej stojana:

$$i_{s(1)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{Re} \left(\underline{I}_s e^{j\vartheta_{s(1)}} \right) \quad (17)$$

$$\vartheta_{s(1)} = \vartheta_{s(1)0} + \int_0^t \omega_x dt \quad (18)$$

$\vartheta_{s(1)0}$ – początkowy kąt między osią fazy pierwszej stojana a osią α układu dwufazowego. Znajomość prądu płynącego w uzwojeniach silnika pozwoli na obliczenie energii w nich wydzielanej w czasie rozruchu.

5. Określenie energii wydzielonej w uzwojeniach

Energia wydzielona w uzwojeniach stojana:

$$W_s = 3R_s \int_0^{t_R} i_s^2(t) dt \quad (19)$$

R_s – rezystancja fazowa uzwojenia stojana. Z uwagi na symetrię rozplywu prądów w poszczególnych prętach klatki, w dalszej części w zależnościach na energię pomija się indeks górny oznaczający numer pręta. Energia wydzielona we wszystkich prętach klatki wirnika:

$$W_b = N_r R_b \int_0^{t_R} i_b^2(t) dt \quad (20)$$

R_b – rezystancja pręta klatki. Energia pręta wydzielona w warstwie i :

$$W_{b(i)} = R_b n \int_0^{t_R} i_{b(i)}^2(t) dt \quad (21)$$

Energia wydzielona w pierścieniach zwierających klatki wirnika:

$$W_{er} = 2N_r R_{er} \int_0^{t_R} i_{er}^2(t) dt \quad (22)$$

R_{er} – rezystancja segmentu pierścienia zwierającego, gdzie:

$$i_{er} = i_r^{(j)} \quad (23)$$

Całkowita energia wydzielona w uzwojeniu wirnika silnika w czasie rozruchu:

$$W_r = W_b + W_{er} \quad (24)$$

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 głębokożłobkowego o danych: $P_N = 320$ kW, $U_N = 6000$ V przy połączeniu w gwiazdę, $p = 3$. Wymiary pręta klatki: $b = 0.005$ m, $h = 0.062$ m. Moment bezwładności mas wirujących w obu przypadkach przyjęto: $J = 5J_N$ (J_N – naturalny moment bezwładności silnika). W przypadku rozruchu z momentem obciążenia założono, że jego wartość jest stała w czasie trwania rozruchu i wynosi $T_s = T_N/3$. W przypadku rozruchu w układzie łagodnego rozruchu przyjęto: czas narastania napięcia $t_{nU} = t_R$, współczynnik zmniejszenia napięcia $k_{zU} = 0.5$. W przypadku próby rozruchu z awaryjnie zablokowanym wirnikiem przyjęto czas pracy silnika równy 1,5 s. Obliczenia wykonano przy podziale pręta klatki na $n = 10$ elementów (rys. 1). Przyjęto $\omega_x = 0$ (transformacja na płaszczyznę stojana) oraz $\vartheta_{s(1)0} = 0$. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 2 - 5. Z rysunków 2 i 3 wynika, że poprzez zastosowanie układu łagodnego rozruchu znacznie ogranicza się niekorzystne działanie prądu rozruchowego na sieć zasilającą oraz zmniejsza narażenia maszyny związane z elektrodynamicznym oddziaływaniem prądu w uzwojeniach. Porównanie obu rysunków wykazuje ponadto, że zastosowanie rozruchu łagodnego

go 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 analizowanym przypadku około 2,8 razy) w porównaniu do rozruchu bezpośredniego. 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, otrzymuje się:

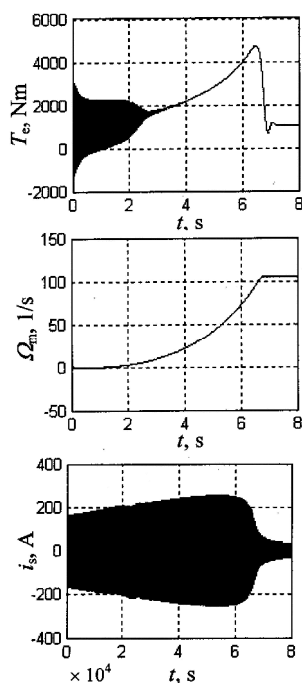
$$\frac{W_r^S}{W_r^D} \Big|_{T_s=0} = 0,970$$

Podobnie, dla uzwojenia stojana:

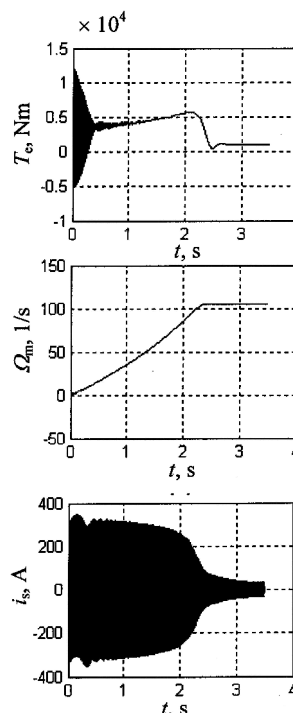
$$\frac{W_s^S}{W_s^D} \Big|_{T_s=0} = 0,972$$

oraz dla obu uzwojeń silnika:

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



Rys. 2. Przebiegi momentu T_e , prędkości kątowej wirnika Ω_m , prądu stojana i_s w czasie rozruchu silnika z momentem obciążenia w układzie łagodnego rozruchu



Rys. 3. Przebiegi momentu T_e , prędkości kątowej wirnika Ω_m , i prądu stojana i_s w czasie bezpośredniego rozruchu silnika z momentem obciążenia

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 spowodowanych różnymi czasami rozruchów. W przypadku rozruchu z momentem obciążenia mamy:

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

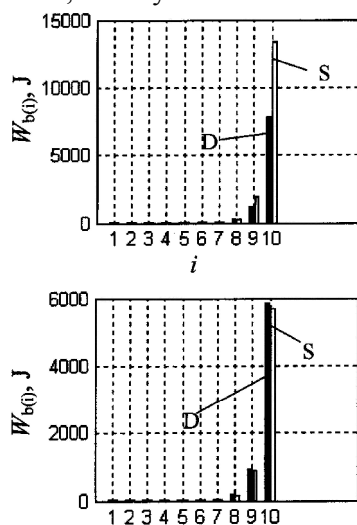
$$\frac{W^S}{W^D} \Big|_{T_s \neq 0} = 1,642$$

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:

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

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

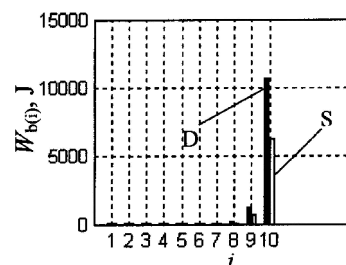
Energia wydzielona w uzwojeniach silnika przy próbie rozruchu z zablokowanym wirnikiem jest znacznie mniejsza (o około 42 %), gdy ta próba odbywa się w układzie łagodnego rozruchu. Z rysunków 2 i 3 wynika, że w czasie rozruchu w układzie łagodnego rozruchu przez długi okres rozruchu utrzymuje się w wirniku 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. Wyniki obliczeń energii wydzielonej w poszczególnych przewodach elementarnych pręta klatki przedstawia rysunku 4 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. 4. 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 4 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 przecie uzwojenia klatkowego. W obu przypadkach rozruchu najwięcej energii wydzielili się w górnych warstwach pręta. Jednak w przypadku rozruchu w układzie łagodnego rozruchu z mo-

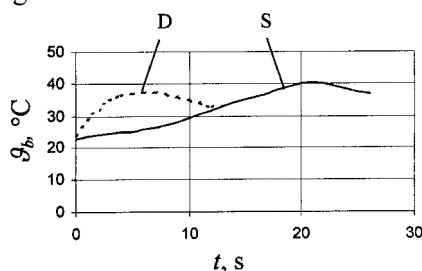
mentem obciążenia wydzielili się tej energii znacznie więcej niż przy rozruchu bezpośrednim, a różnice energii są stosunkowo duże, szczególnie w górnych warstwach pręta. Może to być przyczyną nadmiernego wzrostu temperatury tych miejsc i powstania szkodliwych naprężeń mechanicznych mogących być przyczyną uszkodzenia uzwojenia klatkowego. Wyniki obliczeń energii wydzielonej w poszczególnych przewodach elementarnych pręta klatki dla próby rozruchu z awaryjnie zablokowanym wirnikiem przedstawia rysunku 5. 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. 5. 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. Na rysunku 6 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 przyszczeliny warstw pręta, gdyż wskutek silnego

wypierania prądu wydzieli się tam najwięcej energii.



Rys. 6. Zmierzona temperatura pręta klatki wirnika w czasie rozruchu badanego silnika (D – rozruch bezpośredni, S – rozruch w układzie łagodnego rozruchu)

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 skutek 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 bez-

władności 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, ss. 53-60
- [2] Mróz J.: *Termiczne uwarunkowania nowoczesnych metod rozruchu silników indukcyjnych klatkowych*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, BOBRME KOMEL, nr 61, 2000, ss. 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, ss. 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, ss. 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, ss. 75-88

Autor

Dr inż. Jan Mróz,
 e-mail: janmroz@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska,
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki,
 Katedra Elektrodynamiki i Układów
 Elektromaszynowych,
 ul. W.Pola 2, 35-959 Rzeszów