

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

Piotr MALICKI
Południowy Zakład Automatyki i Zabezpieczeń,
ENERGOEFEKT sp. z o.o., Ruda Śląska

OBLICZANIE MOMENTU SYNCHRONICZNEGO DLA PRZYKŁADOWEGO SILNIKA KLATKOWEGO Z PIERŚCIENIEM DODATKOWYM I NIEIZOLOWANĄ KLATKĄ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń amplitudy dominującego momentu synchronicznego powstającego w trójfazowym indukcyjnym silniku klatkowym bez oraz z dodatkowym pierścieniem zwierającym i nieizolowanymi prętami wirnika. Wykazano, że pierścień dodatkowy jest skutecznym środkiem ograniczania momentów synchronicznych, niewrażliwym na prądy poprzeczne.

CALCULATING SYNCHRONOUS TORQUE FOR EXEMPLARY SQUIRREL-CAGE MOTOR WITH ADDITIONAL RING AND UNINSULATED ROTOR-BARS

Summary. Calculations of dominant synchronous torque arising in a squirrel-cage induction motor without and with additional ring and uninsulated rotor-bars are presented in the paper. It has been shown, that the additional ring, which is not influenced by cross-currents, suppresses synchronous torques with good result.

1. WPROWADZENIE

Pasożytnicze momenty synchroniczne powstające w indukcyjnym silniku klatkowym o określonej liczbie żłobków stojana i wirnika można tłumić poprzez zastosowanie odpowiedniego skosu żłobków wirnika, jak również poprzez wprowadzenie dodatkowego pierścienia zwierającego i wzajemne skręcenie połówek wirnika o odpowiedni kąt.

Z praktyki konstrukcyjnej wynika, że tłumiące działanie skosu żłobków na momenty pasożytnicze jest w znacznym stopniu niwelowane przez prądy poprzeczne płynące pomiędzy prętami wirnika, przez co skuteczność tego sposobu jest ograniczona, zwłaszcza w silniku z klatką aluminiową odlewaną.

Innym sposobem tłumienia momentów synchronicznych jest wprowadzenie dodatkowego pierścienia zwierającego w środek pakietu wirnika i odpowiednie skrócenie obydwu połówek wirnika. Pierścień dodatkowy jest stosowany często łącznie ze skosem żłobków, którego wprowadzenie powoduje znaczny wzrost prądów poprzecznych. Celem niniejszego artykułu jest wykazanie, że skuteczność działania pierścienia dodatkowego jest praktycznie niezależna od istnienia prądów poprzecznych pomiędzy prętami wirnika, a więc - że prawidłowo zaprojektowany pierścień dodatkowy dla silnika z klatką izolowaną będzie spełniał swoją rolę również w przypadku silnika z nieizolowaną klatką wirnika.

2. ISTOTA DZIAŁANIA PIERŚCIENIA DODATKOWEGO

Pasożytniczy moment synchroniczny związany z parą harmonicznych przestrzennych (v, ρ) powstaje w maszynie zatrzymanej, a więc przy prędkości $\Omega_{ms} = 0$, albo w zakresie pracy silnikowej przy prędkości $\Omega_{ms} = \frac{2\omega_0}{cQ_r}$, bądź też w zakresie pracy hamulcowej przy prędkości $\Omega_{ms} = -\frac{2\omega_0}{cQ_r}$ (gdzie: ω_0 - pulsacja sieci, Q_r - liczba żłobków wirnika, c - liczba całkowita) [1]. Moment ten w stanie ustalonym ma wartość stałą, zależną tylko od kąta ϑ_0 położenia wirnika w chwili $t=0$. Zależność ta, nazywana charakterystyką kątową momentu pasożytniczego, jest sinusoidalna, a jej okres wynosi [1]:

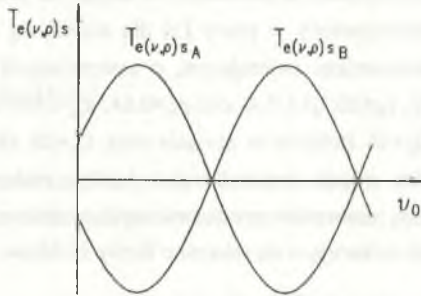
$$T = \frac{2\pi}{\rho \pm v} = \frac{2\pi}{cQ_r} = \frac{|\Omega_{ms}|}{\omega_0} \pi. \quad (1)$$

Moment synchroniczny powstający w silniku z dodatkowym pierścieniem zwierającym jest sumą momentów związanych z obydwoma połówkami wirnika. Jeżeli połówki wirnika są wzajemnie skrócone o kąt

$$\gamma = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{v \pm \rho} = \frac{\pi}{cQ_r} = \frac{|\Omega_{ms}|}{2\omega_0} \pi, \quad (2)$$

to w silniku z izolowanymi prętami wirnika, przy założeniu że rezystancja i indukcyjność rozproszenia pierścienia dodatkowego są równe zero, następuje wzajemne przesunięcie charakterystyk kątowych momentów związanych z obydwoma połówkami o pół okresu

i w konsekwencji - wzajemne ich wygaszenie (rys. 1). Z rozważań przedstawionych w [3] wynika, że w silniku z niez izolowanymi prętami wirnika całkowite stłumienie momentu synchronicznego byłoby możliwe, gdyby rezystancje i indukcyjności rozproszenia zewnętrznych pierścieni zwierających i pierścienia dodatkowego były równe zero.



Rys. 1. Charakterystyki kątowe pasożytniczych momentów synchronicznych związanych z połówkami wirnika skręconymi o kąt $T/2$

Fig. 1. Synchronous torque - angle ϑ_0 curves corresponding to the halves of the rotor mutually turned by the angle $T/2$

Zazwyczaj istnieje w maszynie wiele par harmonicznych przestrzennych generujących momenty pasożytnicze o tej samej prędkości synchronicznej Ω_{ms} . Wypadkowy moment synchroniczny powstający przy prędkości Ω_{ms} jest sumą składników związanych z odpowiednimi parami harmonicznych przestrzennych. Charakterystyki kątowe momentów synchronicznych powstających przy tej samej prędkości $\Omega_{ms} \neq 0$ mają takie same okresy dane wzorem (1). Zatem przy kącie wzajemnego skręcenia połówek wirnika określonym wzorem (2) następuje wygaszenie wypadkowego momentu synchronicznego powstającego przy prędkości Ω_{ms} różnej od zera, gdyż wygaszone zostają wszystkie jego składniki. Charakterystyki kątowe momentów synchronicznych powstających przy prędkości $\Omega_{ms} = 0$ mogą mieć w ogólnym przypadku różne okresy. Całkowite wygaszenie wypadkowego momentu synchronicznego powstającego przy prędkości $\Omega_{ms} = 0$ poprzez wprowadzenie pierścienia dodatkowego nie jest w takim przypadku możliwe. Można wtedy wygasić tylko wybrane momenty składowe o takim samym okresie charakterystyk kątowych [2].

3. TLUMIENIE MOMENTU SYNCHRONICZNEGO W SILNIKU Sg 132 S-4

W rzeczywistym silniku rezystancje i indukcyjności rozproszenia pierścieni zwierających są różne od zera. Badanie wpływu prądów poprzecznych na skuteczność działania dodatkowego pierścienia zwierającego przy uwzględnieniu rzeczywistych wartości rezystancji i indukcyjności rozproszenia pierścieni zwierających przeprowadzono w oparciu o model matematyczny przedstawiony w pracy [3] dla silnika Sg 132 S-4 produkowanego seryjnie z dodatkowym pierścieniem zwierającym, o następujących danych znamionowych: $P_n=5.5$ kW, $U_n=380/220$ V, $I_n=20.2/11.7$ A, $\cos \phi_n=0.84$, $n_n=1450$ obr/min, $p=2$.

Silnik ten posiada $Q_S=36$ żłobków w stojanie oraz $Q_r=28$ żłobków w wirniku. Taka kombinacja liczby żłobków stojana i wirnika jest bardzo niekorzystna ze względu na powstawanie pasożytniczych momentów synchronicznych w zakresie pracy silnikowej [1]. Spełnione są dwie równości wskazujące na zakazane liczby żłobków:

$$Q_r=(6k+2)p \quad \text{dla } k=2 \quad (3)$$

$$Q_r=Q_S-4p \quad (4)$$

Na rys. 6 przedstawiono obliczoną charakterystykę mechaniczną silnika bez dodatkowego pierścienia zwierającego w przypadku prostych żłobków z zaznaczoną amplitudą momentu synchronicznego I rzędu powstającego w zakresie pracy silnikowej przy prędkości obrotowej 214.3 obr/min. Amplituda momentu pasożytniczego jest znacznie większa od momentu krytycznego. Dominujące składniki tego momentu są związane z parami harmonicznymi (2,26) i (10,38). Harmoniczna o rzędzie 2 jest harmoniczną główną ($v=p$), harmoniczna o rzędzie 26 - harmoniczną żłobkową wirnika ($v=Q_r-p$), harmoniczna o rzędzie 38 - harmoniczną żłobkową stojana ($v=Q_S+p$), a harmoniczna o rzędzie 10 - harmoniczną strefową stojana o dużej amplitudzie ($v=5p$). Prędkości synchroniczne rozważanych składników są równe:

$$\Omega_{ms} = \frac{2\omega_0}{\rho + \nu} = \frac{2 \cdot 2\pi \cdot 50}{26 + 2} = 22.4 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \text{dla składnika związanego z parą (2,26),} \quad (5)$$

$$\Omega_{ms} = \frac{2\omega_0}{\rho - \nu} = \frac{2 \cdot 2\pi \cdot 50}{38 - 10} = 22.4 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \text{dla składnika związanego z parą (10,38)} \quad (6)$$

równe są też okresy ich charakterystyk kątowych:

$$T = \frac{2\pi}{\rho + \nu} = \frac{2\pi}{26 + 2} = 0.224 \text{ rad} \quad \text{dla składnika związanego z parą (2,26),} \quad (7)$$

$$T = \frac{2\pi}{\rho - \nu} = \frac{2\pi}{38 - 10} = 0.224 \text{ rad} \quad \text{dla składnika związanego z parą (10,38).} \quad (8)$$

Wypadkowy moment synchroniczny ma więc także okres T , który odpowiada podziałce żłobkowej wirnika:

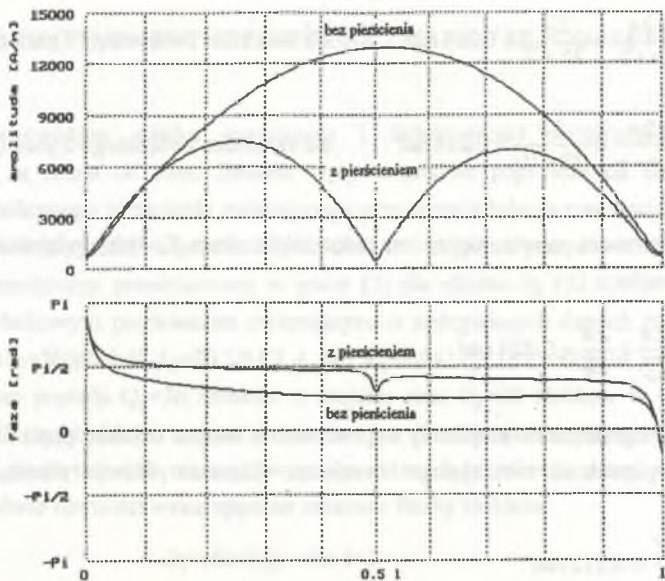
$$T = \frac{2\pi}{Q} = \frac{2\pi}{28} = 0.224 \text{ rad}. \quad (9)$$

Znaczne ograniczenie amplitudy tego momentu można uzyskać przez wprowadzenie dodatkowego pierścienia zwierającego i wzajemne skręcenie połówek wirnika wokół wału o kąt:

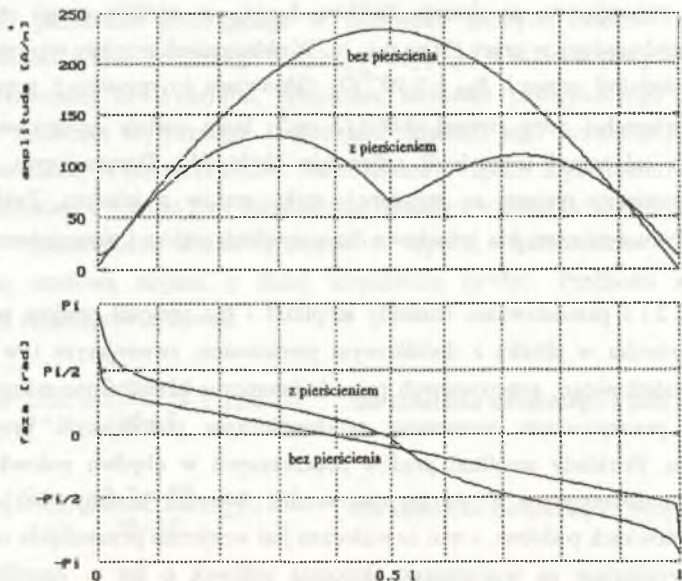
$$\gamma = \frac{T}{2} = 0.112 \text{ rad} \quad (10)$$

odpowiadający połowie podziałki żłobkowej. Taki właśnie kąt skręcenia połówek wirnika został zastosowany w rozpatrywanym silniku. Silnik ten jest produkowany z dodatkowym pierścieniem zwierającym, ze skosem żłobków $b_{sk} = \tau_r$, w wyniku czego otrzymuje się przypadek przedstawiony w pracy [3] na rys. 1c. W obliczeniach przyjęto wartość rezystancji pomiędzy sąsiednimi prętami $R_{bb} = 5 \cdot 10^{-5} \Omega$. Odpowiada to rezystancji poprzecznej dla jednostki powierzchni pręta równej $0.003 \Omega \cdot \text{cm}^2$, która została zmierzona dla silnika Sg 132 S-6 o tej samej technologii odlewania klatki [4]. Dominującym składnikiem rezystancji pomiędzy prętami są rezystancje styku prętów z żelazem. Zakłada się, że rezystancja styku z żelazem jest jednakowa dla wszystkich prętów i równomiernie rozłożona wzdłuż pręta.

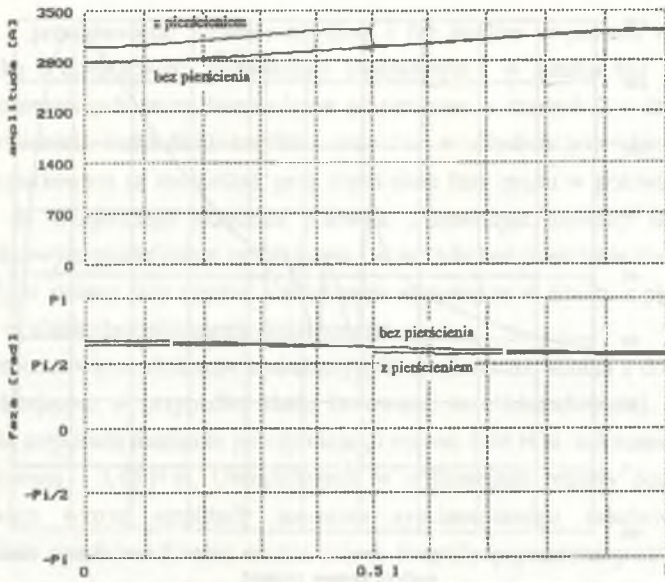
Na rys. 2 i 3 przedstawiono rozkłady amplitud i faz gęstości prądów poprzecznych wzdłuż osi wirnika w silniku z dodatkowym pierścieniem zwierającym i w silniku bez pierścienia dodatkowego, generowanych przez harmoniczne przestrzenne o rzędach 2 i 26, związane z pasywnym momentem synchronicznym powstającym przy prędkości 214.3 obr/min. Rozkłady amplitud prądów poprzecznych w obydwu połówkach wirnika z pierścieniem dodatkowym różnią się nieznacznie. Również kształty rozkładów faz są w obydwu połówkach podobne, z tym że widoczne jest wzajemne przesunięcie odpowiednich rozkładów wynikające ze wzajemnego skręcenia połówek o kąt γ . Amplitudy prądów poprzecznych w silniku z pierścieniem dodatkowym są mniejsze niż w silniku bez pierścienia dodatkowego i osiągają lokalne minimum w środku długości pakietu.



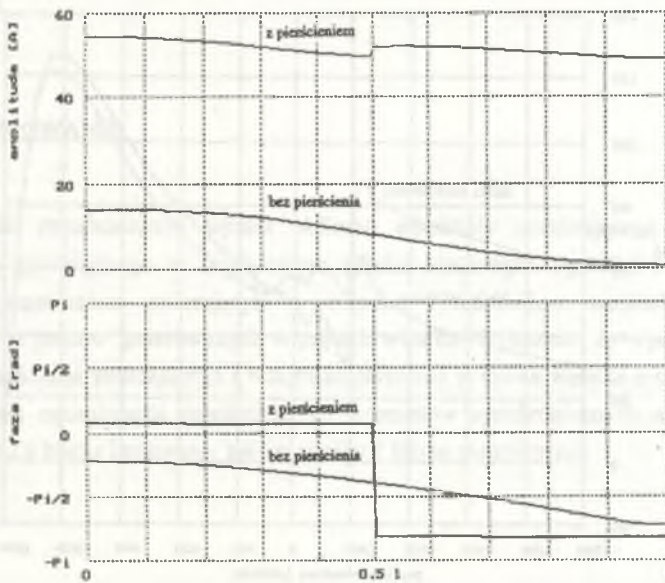
Rys. 2. Rozkłady gęstości liniowej prądu poprzecznego od 2 harmonicznej przestrzennej
 Fig. 2. Distributions of the cross-current density corresponding to the 2nd space harmonic



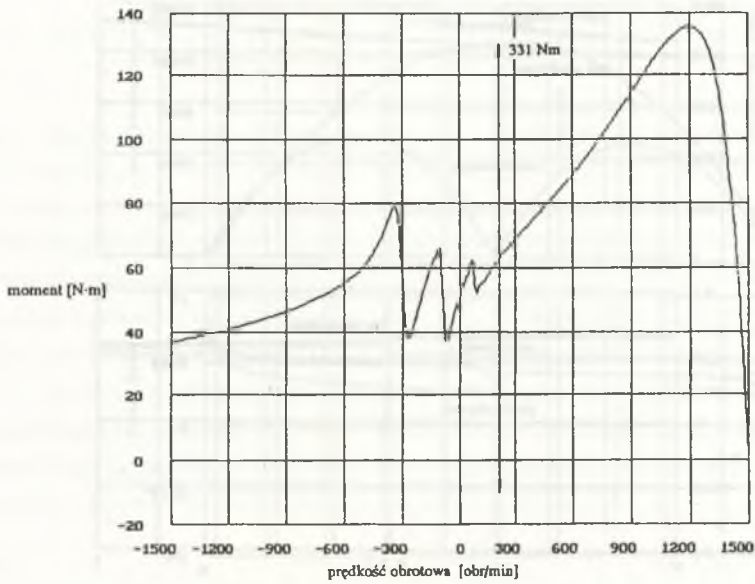
Rys. 3. Rozkłady gęstości liniowej prądu poprzecznego od 26 harmonicznej przestrzennej
 Fig. 3. Distributions of the cross-current density corresponding to the 26th space harmonic



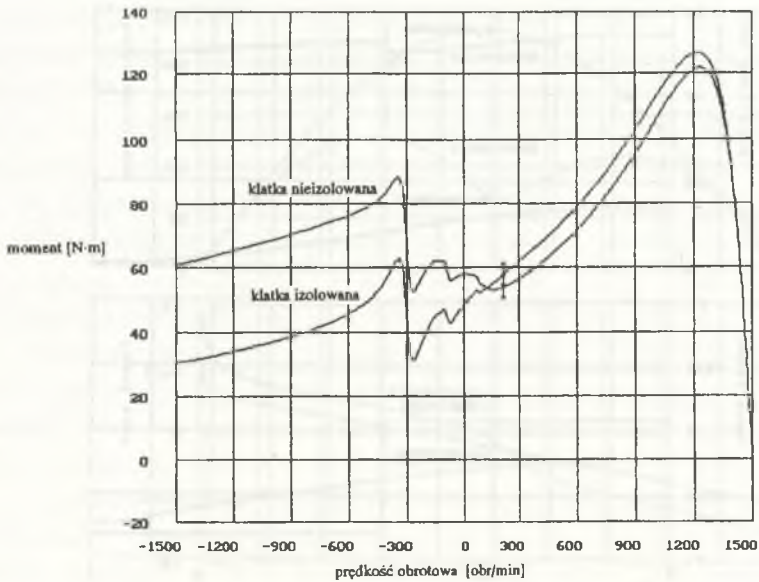
Rys. 4. Rozkłady prądu generowanego w pręcie wirnika przez 2 harmoniczną przestrzenną
 Fig. 4. Distributions of the bar-current corresponding to the 2nd space harmonic



Rys. 5. Rozkłady prądu generowanego w pręcie wirnika przez 26 harmoniczną przestrzenną
 Fig. 5. Distributions of the bar-current corresponding to the 26th space harmonic



Rys. 6. Charakterystyka mechaniczna silnika bez pierścienia dodatkowego
 Fig. 6. Torque-speed curve of the motor without additional ring



Rys. 7. Charakterystyka mechaniczna silnika z pierścieniem dodatkowym
 Fig. 7. Torque-speed curve of the motor with additional ring

Na rys. 4 i 5 przedstawiono rozkłady amplitud i faz prądów w prętach wzdłuż ich długości w silniku z dodatkowym pierścieniem zwierającym i w silniku bez pierścienia dodatkowego, generowanych przez harmoniczne przestrzenne o rzędach 2 i 26. Różnice pomiędzy odpowiednimi rozkładami amplitud oraz faz w obydwu połówkach wirnika z pierścieniem dodatkowym są niewielkie, przy czym skok fazy prądu w połowie długości wirnika wynika ze wzajemnego skręcenia połówek. Porównując rozkłady faz prądów w modelu z dodatkowym pierścieniem zwierającym i w modelu bez pierścienia dodatkowego można zauważyć, że zmiany fazy prądów wzdłuż pręta są mniejsze w silniku z pierścieniem dodatkowym niż w silniku bez pierścienia dodatkowego.

Na rys. 7 przedstawiono obliczone charakterystyki mechaniczne silnika z dodatkowym pierścieniem zwierającym w przypadku klatki izolowanej oraz nieizolowanej. W silniku z klatką izolowaną amplituda momentu pasożytniczego wynosi 3.46 N·m, natomiast w silniku z klatką nieizolowaną - 3.65 N·m. Uwzględnienie w obliczeniach prądów poprzecznych spowodowało więc wzrost amplitudy momentu synchronicznego zaledwie o 5%. W kontekście takich wyników obliczeń można uznać, że prądy poprzeczne praktycznie nie pogarszają skuteczności działania dodatkowego pierścienia zwierającego. Porównując rys. 6 i 7 można stwierdzić, że moment synchroniczny w silniku z pierścieniem dodatkowym jest praktycznie stłumiony, co potwierdzają wyniki pomiarów momentu dla silnika z klatką nieizolowaną [5].

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń amplitudy dominującego momentu synchronicznego powstającego w trójfazowym silniku klatkowym Sg 132 S-6 bez oraz z dodatkowym pierścieniem zwierającym w wirniku. Przedstawiono rozkłady prądów poprzecznych oraz prądów generowanych w prętach wirnika. Wykazano, że wprowadzenie dodatkowego pierścienia zwierającego i wzajemne skręcenie połówek wirnika o odpowiedni kąt jest sposobem ograniczania pasożytniczych momentów synchronicznych skutecznym zarówno w silniku z klatką izolowaną, jak i w silniku z klatką nieizolowaną.

LITERATURA

1. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Momenty pasożytnicze w indukcyjnych silnikach klatkowych. Prace Sekcji Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Komitetu Elektrotechniki PAN, PTETiS, Warszawa - Gliwice 1993.
2. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Squirrel-cage motor with additional ring in rotor. *Electric Machines and Power Systems* 21, 1993, 1-9.
3. Kluszczyński K., Malicki P.: Pasożytnicze momenty synchroniczne w silniku klatkowym z pierścieniem dodatkowym i niez izolowanymi prętami wirnika. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka* z. 154, Gliwice 1996.
4. Malicki P.: Momenty pasożytnicze w trójfazowych indukcyjnych silnikach klatkowych bez oraz z dodatkowym pierścieniem zwierającym w wirniku przy uwzględnieniu prądów poprzecznych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1995.
5. Krytyczna analiza i weryfikacja istniejących metod obliczeń momentów pasożytniczych w silnikach indukcyjnych na przykładzie silników o wzniosie osi wału 132 - 180 mm. Opracowanie nr 5/138/87/88 Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej, Gliwice 1988. Praca zbiorowa nie publikowana. Autorzy: K. Kluszczyński, R. Miksiewicz, B. Drak, W. Paszek, M. Noga, J. Rusek.

Recenzent: Dr hab. inż. Piotr Wach, prof. WSI w Opolu

Wpłynęło do Redakcji dnia 9 listopada 1995 r.

Abstract

Parasitic synchronous torques arising in a squirrel cage induction motor can be suppressed by skewing the rotor slots as well as by inserting an additional ring joining all the bars of the cage in the midst of the rotor length. In the motor with uninsulated rotor-bars cross currents flowing from one bar to another through the iron change distribution of rotor current. Effectiveness of the skew in a motor with uninsulated rotor-bars is significantly lower than that in the motor with insulated rotor-bars. A rotor with additional ring can have skewed slots. In a motor with skewed rotor-slots cross-currents are significantly increased. Cross-current density distributions corresponding to the 2nd and 26th space harmonics related to the dominant synchronous torque, calculated for a 5.5 kW motor are presented in Fig. 2 and 3. Bar-current density distributions corresponding to the 2nd and 26th space harmonics are presented in Fig. 4 and 5. Torque-speed curves calculated for the motor without and with additional ring are presented in Fig. 6 and 7, respectively. The parasitic torque in the motor with additional ring is practically suppressed. The amplitude of the synchronous torque in the motor with additional ring and uninsulated rotor-bars is only about 5% greater than that in the motor with insulated rotor-bars. Therefore, the additional ring can be regarded as a convenient method of suppressing synchronous torques, not influenced by cross-currents.