

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

Piotr MALICKI

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej**DOBÓR DODATKOWEGO PIERŚCIENIA ZWIERAJĄCEGO W ŚRODKU PAKIETU WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO**

Streszczenie. Omówiono podstawowe własności pasożytniczych momentów synchronicznych, powstających w indukcyjnych silnikach klatkowych. Przedstawiono sposób redukcji wybranego pasożytniczego momentu synchronicznego, polegający na wprowadzeniu dodatkowego pierścienia zwierającego w środek rdzenia wirnika i na skręceniu tak powstałych połówek dookoła wału o pewien kąt γ . Omówiono zasady projektowania dodatkowego pierścienia zwierającego.

CHOICE OF ADDITIONAL RING IN THE MIDST OF ROTOR CORE IN SQUIRREL-CAGE MOTOR

Summary. Basic properties of synchronous parasitic torques arising in squirrel-cage motors have been described. A method for reducing chosen synchronous parasitic torque based on inserting an additional ring in the midst of a rotor core and on shifting both halves of the rotor by the certain angle γ around a shaft is presented. Rules for designing of such an additional ring are given in the paper.

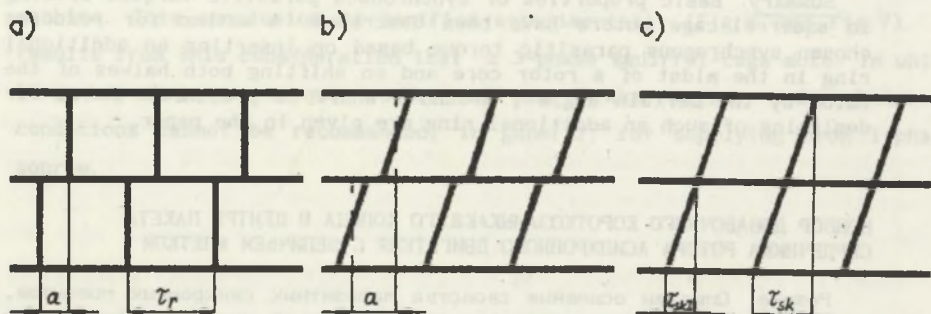
ПОДБОР ДОБАВОЧНОГО КОРОТКОЗАМЫКАЮЩЕГО КОЛЬЦА В ЦЕНТРЕ ПАКЕТА СЕРДЕЧНИКА РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С БЕЛИЧЬЕЙ КЛЕТКОЙ

Резюме. Описаны основные свойства паразитных синхронных моментов, возникающих в асинхронных двигателях с беличьей клеткой. Представлен способ уменьшения избранного паразитного синхронного момента, который заключается во введении добавочного короткозамыкающего кольца в центр сердечника ротора и в повороте возникших таким образом половинок на некоторый угол γ . Описаны принципы проектирования добавочного короткозамыкающего кольца.

1. WSTĘP

Istotnym wymogiem przy projektowaniu indukcyjnych silników klatkowych jest uniknięcie - poprzez właściwy dobór parametrów konstrukcyjnych, a zwłaszcza liczby żłobków stojana i wirnika - znaczących pasożytniczych momentów synchronicznych. Momenty te, powstające w silniku na skutek wzajemnego elektrodynamicznego oddziaływania wyższych harmonicznych przestrzennych pola magnetycznego w szczelinie maszyny, są przyczyną zależności momentu rozruchowego silnika od kąta początkowego położenia wirnika, pogarszają jego własności dynamiczne przy rozruchu i nawrotach, wywołują wibracje korpusu oraz drgania skrętne wału oraz wzmagają hałas.

Jednym ze skutecznych sposobów ograniczania pasożytniczych momentów synchronicznych w indukcyjnych silnikach klatkowych, znajdującym zastosowanie również w polskim przemyśle elektromaszynowym, jest wprowadzenie dodatkowego pierścienia zwierającego w środek pakietu wirnika i wzajemne skrócenie powstałych w ten sposób połówek wirnika wokół wału o odpowiednio dobrany kąt γ . W zależności od tego, czy wirnik posiada żłobki proste, czy też skośne oraz od tego, jaki jest kąt skrócenia γ , możliwe są 3 różne przypadki przedstawione na rys.1.



Rys.1. Fragment rozwiniętego obwodu wirnika ze żłobkami prostymi (a) i skośnymi (b), (c)

Fig.1. Portion of a developed rotor periphery with unskewed (a) and skewed slots (b), (c)

Rys. 1c przedstawia szczególny przypadek. Ze względu na to, że odcinek a , o jaki przesunięte są na obwodzie obie połówki wirnika, jest równy połowie odcinka skosu τ_{sk} :

$$a = \frac{\tau_{sk}}{2}, \quad (1)$$

pręty obydwu połówek wzajemnie przedłużają się.

Analizując silnik z dodatkowym pierścieniem w środku pakietu rdzenia dogodnie jest traktować obie połówki wirnika, powstałe w wyniku wprowadzenia pierścienia dodatkowego, jako dwa oddzielne wirniki I i II, mające jeden z pierścieni zwierających wspólny. To, jak określa się kąt γ wzajemnego skręcenia wirnika I. względem wirnika II ($\gamma = \frac{2a}{d_r}$, d_r - średnica wirnika) w przypadku skośnych zębów wirnika, tłumaczy rys. 1b.

Głównym celem niniejszej pracy jest przedstawienie sposobu doboru dodatkowego pierścienia w środku pakietu żelaza, a mianowicie - kąta wzajemnego skręcenia połówek γ oraz wymiarów geometrycznych pierścienia dodatkowego tak, aby doprowadzić do wytłumienia wybranego niepożądanego momentu synchronicznego.

2. MECHANIZM POWSTAWANIA PASOŻYTNICZYCH MOMENTÓW SYNCHRONICZNYCH

3-fazowe 2p-biegunowe uzwojenie stojana zasilane symetrycznym 3-fazowym układem napięć generuje w szczelinie powietrznej maszyny przepływ magnetyczny zawierający harmoniczne przestrzenne o rzędach $\nu = p, 5p, 7p, 11p, 13p \dots$ (rzędy harmonicznych przestrzennych określono w odniesieniu do pełnego obwodu maszyny, tak więc pierwszą harmoniczną $\nu=1$ jest harmoniczna podstawowa, o okresie odpowiadającym pełnemu obwodowi szczeliny maszyny, zaś harmoniczna główna, czyli pracująca, posiada rząd $\nu=p$). Wśród wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu stojana największe amplitudy osiągają harmoniczne strefowe niskiego rzędu ($\nu = 5p, 7p, 11p, 13p$) oraz harmoniczne zębówkowe stojana o rzędach określonych relacją $\nu=cQ_s \pm p$, gdzie: c - liczba całkowita, Q_s - liczba zębów stojana (wynika to z tego, że harmoniczne zębówkowe stojana charakteryzują się tym samym współczynnikiem uzwojenia, co harmoniczna główna).

Q_r -zębówkowe uzwojenie klatkowe wirnika, pobudzone p -tą harmoniczną przestrzenną pola magnetycznego, generuje przepływ magnetyczny zawierający

harmoniczne przestrzenne o rzędach określonych równością $\nu = cQ_r \pm p$, gdzie c - liczba całkowita. Największe amplitudy osiągają harmoniczne żłobkowe wirnika będące reakcją uzwojenia klatkowego na harmoniczną p -tą (główną). Harmoniczne te posiadają rzędy $\nu = cQ_r \pm p$.

Wskutek oddziaływania ν -tej harmonicznej przestrzennej stojana z ν -tą harmoniczną przestrzenną wirnika, wytworzoną przez uzwojenie wirnika pobudzone p -tą harmoniczną przestrzenną stojana ($\nu \neq p$), powstaje w maszynie pasożytniczy moment pulsujący, który przy prędkości obrotowej zwanej prędkością synchroniczną momentu pasożytniczego przyjmuje w stanie ustalonym wartość stałą. Przy innych prędkościach obrotowych moment ten jest momentem pulsującym o częstotliwości zmieniającej się wraz z prędkością wirowania wirnika. W zależności od rzędów par harmonicznych (ν, p), uczestniczących w powstawaniu momentu pasożytniczego, prędkość synchroniczna może być równa:

$$\omega_s = 0, \quad \omega_s = \frac{2\omega_0}{p \pm \nu} \quad \text{lub} \quad \omega_s = -\frac{2\omega_0}{p \pm \nu} \quad (2)$$

gdzie ω_0 - częstotliwość sieci.

Można wykazać, że wszystkie pary harmonicznych przestrzennych (ν, p), uczestniczące w powstawaniu pasożytniczych momentów synchronicznych, spełniają relację:

$$\nu \pm p = cQ_r \quad (3)$$

gdzie c - liczba całkowita.

Reasumując, ze wzoru (2) i (3) wynika, że pasożytniczy moment synchroniczny powstaje w maszynie zatrzymanej, a więc przy $\omega_s = 0$, albo w zakresie pracy silnikowej przy prędkości $\omega_s = \frac{2\omega_0}{cQ_r}$, bądź też - w zakresie pracy hamulcowej przy prędkości $\omega_s = -\frac{2\omega_0}{cQ_r}$. Momenty synchroniczne powstające przy prędkości równej zero są przyczyną zależności momentu rozruchowego od początkowego położenia wirnika, albowiem na moment rozruchowy maszyny składa się moment asynchroniczny, niezależny od kąta wirnika oraz pasożytniczy moment synchroniczny, zależny od niego.

Pasożytnicze momenty synchroniczne powstające w zakresie pracy silnikowej pogarszają dynamiczne własności rozruchowe maszyny, powodują wydłużenie czasu rozruchu oraz oscylacje wirnika przy przechodzeniu przez prędkości synchroniczne. Przy bardzo dużej amplitudzie pasożytniczego momentu synchronicznego, niekorzystnym początkowym położeniu wirnika oraz dużym momencie obciążenia lub momencie bezwładności silnik może zostać wciągnięty

w synchronizm przez synchroniczny moment pasożytniczy, w wyniku czego wirnik nie osiągnie prędkości znamionowej, lecz będzie wirować z niewielką prędkością, odpowiadającą prędkości synchronicznej.

Pasożytniczy moment synchroniczny powstający w zakresie pracy hamulcowej w mniejszym stopniu oddziałuje na przebieg rozruchu silnika. Jego niekorzystny wpływ zaznacza się jednak wyraźnie przy dokonywaniu nawrotów.

3. PASOŻYTNICZE MOMENTY SYNCHRONICZNE W SILNIKU Z DODATKOWYM PIERŚCIENIEM ZWIERAJĄCYM

W silniku z dodatkowym pierścieniem zwierającym w środku pakietu rdzenia wirnika wypadkowy pasożytniczy moment synchroniczny, związany z uporządkowaną parą harmonicznych (ν, ρ) , jest sumą momentów wytworzonych przez współdziałanie prądu stojana z prądami I i II wirnika i może być obliczony wg następującego ogólnego wzoru:

$$T_{e(\nu, \rho)} = k \operatorname{Re} \left\{ \pm j I_s^* \left[I_{rI\rho}^{(*)} + I_{rII\rho}^{(*)} e^{\pm j(\nu \pm \rho)\gamma} \right] e^{\pm j(\nu \pm \rho)\theta_0} \right\} \quad (4)$$

$$k = \nu \frac{1}{2} L_{m\nu} \frac{k_{wsp} k_{wr\nu} k_{skI\nu}}{k_{wsv} k_{wr\rho} k_{skI\rho}}$$

gdzie:

I_s - prąd stojana,

$I_{rI\rho}$, $I_{rII\rho}$ - prąd I i II wirnika, związany z ρ -tą harmoniczną przestrzenną,

θ_0 - kąt położenia wirnika w chwili zaistnienia stanu ustalonego,

$L_{m\nu}$ - indukcyjność magnesująca maszyny dla ν -tej harmonicznej przestrzennej,

k_{wsv} , $k_{wr\nu}$, k_{wsp} , $k_{wr\rho}$ - współczynnik uzwojenia stojana i wirnika dla ν -tej i ρ -tej harmonicznej przestrzennej,

$k_{skI\nu}$, $k_{skI\rho}$ - współczynnik skosu odniesiony do połowy długości maszyny (dla połówki maszyny) dla ν -tej i ρ -tej harmonicznej przestrzennej.

Znaki \pm oraz znak sprzężenia $(*)$ we wzorze (4) zależą od kierunków wirowania ν -tej harmonicznej przestrzennej przepływu stojana i wirnika oraz ρ -tej harmonicznej przestrzennej przepływu stojana i wirnika. Prąd I_s oraz $I_{rI\rho}$ i $I_{rII\rho}$ można wyznaczyć opierając się na schemacie zastępczym silnika [3][4].

Kąt θ_0 , określający położenie wirnika w chwili zaistnienia stanu ustalonego, może być również zdefiniowany w inny sposób jako kąt zawarty pomiędzy osią pierwszego uzwojenia fazowego stojana a osią symetrii pierwszego oczka klatki wirnika, widoczny przy oświetlaniu maszyny - wirującej z prędkością równą prędkości synchronicznej momentu pasożytniczego ω_s - lampą stroboskopową, rozbłyskującą z częstotliwością kołową równą prędkości synchronicznej ω_s . Kąt ten spełnia tę samą rolę, co kąt mocy w teorii maszyny synchronicznej. Charakterystyka $T_{e(\nu, \rho)} = f(\theta_0)$ nosi nazwę charakterystyki kątowej pasożytniczego momentu synchronicznego i jest - jak wynika ze wzoru (4) - krzywą sinusoidalną o okresie $T = \frac{2\pi}{\nu \pm \rho} = \frac{2\pi}{cQ_r} = \frac{\tau_r}{c}$, gdzie τ_r - podziałka żłobkowa wirnika.

Pasożytniczy moment synchroniczny powstający przy danej prędkości synchronicznej ω_s jest zazwyczaj wynikiem działania kilku różnych par harmonicznych, co oznacza, że dla wyznaczenia wypadkowej charakterystyki kątowej momentu synchronicznego przy prędkości ω_s należy obliczyć sumę:

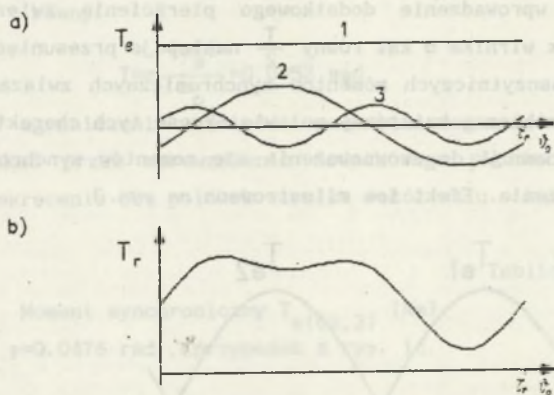
$$T_e(\theta_0) = \sum T_{e(\nu, \rho)}(\theta_0).$$

O tym, czy charakterystyka $T_e(\theta_0)$ jest funkcją sinusoidalną, czy też niesinusoidalną, decydują więc okresy charakterystyk składowych, związanych z poszczególnymi parami harmonicznych (ν, ρ) . Okazuje się, że pasożytnicze momenty synchroniczne związane z różnymi parami harmonicznych (ν, ρ) , ale posiadające tę samą prędkość synchroniczną, znajdującą się w zakresie pracy silnikowej, bądź też w zakresie pracy hamulcowej, mają równe okresy charakterystyk kątowych o wartości:

$$T = \pi \frac{|\omega_s|}{\omega_0} \quad (5)$$

czyli wypadkowa charakterystyka kątowa momentów synchronicznych związanych z takimi prędkościami jest zawsze krzywą sinusoidalną. Ze względu na wzajemne przesunięcie kątowe charakterystyk $T_{e(\nu, \rho)}(\theta_0)$ - amplituda charakterystyki wypadkowej $T_e(\theta_0)$ jest jednak mniejsza od sumy arytmetycznej amplitud poszczególnych charakterystyk składowych. Czasami - ze względu na znaczne uproszczenie obliczeń - dokonuje się tylko oszacowania górnej wartości amplitudy wypadkowego momentu synchronicznego poprzez arytmetyczne zsumowanie amplitud sinusoidalnych charakterystyk kątowych związanych z poszczególnymi parami harmonicznych (ν, ρ) .

Zupełnie odmiennie przedstawia się sytuacja w przypadku wypadkowego momentu synchronicznego, powstającego przy prędkości $\omega_s = 0$, albowiem - jak można wykazać - charakterystyki kątowe związane z różnymi parami harmonicznymi przestrzennych mogą mieć różne okresy o wartości $T = \frac{\tau_r}{c}$, gdzie $c = 1, 2, 3, \dots$. Charakterystyka wypadkowego momentu synchronicznego w maszynie zatrzymanej jest więc w ogólnym przypadku krzywą niesinusoidalną. Należy zwrócić uwagę, że dla momentów synchronicznych powstających przy $\omega_s = 0$ charakterystyka kątowa jest równocześnie charakterystyką określającą zależność pasozytniczego momentu synchronicznego od kąta początkowego położenia wirnika. Wypadkowa charakterystyka momentu rozruchowego silnika jest sumą momentu asynchronicznego o wartości stałej, niezależnej od położenia wirnika oraz charakterystyki kątowej momentu synchronicznego, opisanej powyżej. Na rys.2 przedstawiono przykładowy przebieg charakterystyki momentu rozruchowego $T_r = f(\theta_0)$, przy założeniu że w maszynie przy $\omega_s = 0$ powstają pasozytnicze momenty synchroniczne o charakterystykach kątowych, mających okresy $\tau_r, \frac{\tau_r}{2}$.



Rys.2. Charakterystyka momentu rozruchowego:

- charakterystyki momentów składowych: asynchronicznego (1) i pasozytniczych momentów synchronicznych (2), (3)
- charakterystyka wypadkowa

Fig.2. Starting torque - rotor angle θ_0 curve:

- curves for components: asynchronous (1) and synchronous parasitic torques (2), (3)
- resultant curve

4. ZASADY DOBORU PIERŚCIENIA DODATKOWEGO

Jeśli przyjąć wstępne założenie, że rezystancja i indukcyjność rozproszenia dodatkowego pierścienia zwierającego są nieskończenie małe, to spełniona jest równość:

$$I_r I_\rho = I_r II_\rho = I_\rho \quad (6)$$

a wzór (4) przyjmuje wówczas postać:

$$T_{e(\nu, \rho)} = k \operatorname{Re} \left\{ \pm j I_s^* I_{r\rho}^{(*)} \left(1 + e^{\pm j(\nu \pm \rho)\gamma} \right) e^{\pm j(\nu \pm \rho)\theta_0} \right\} \quad (7)$$

Wynika stąd, że przy

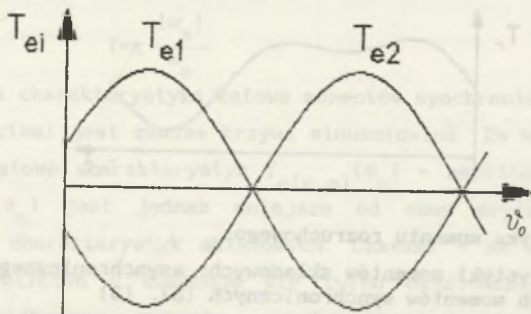
$$\gamma = \frac{\pi}{\nu \pm \rho} = \frac{\pi}{c Q_r} = \frac{\tau_r}{2c} \quad (8)$$

następuje całkowite stłumienie pasożytniczego momentu synchronicznego, związanego z parą harmoniczych (ν, ρ) .

Biorąc pod uwagę, że $T = \frac{\tau_r}{c}$, otrzymujemy równość

$$\gamma = \frac{T}{2}, \quad (9)$$

która pozwala na fizyczną interpretację istoty działania pierścienia dodatkowego. Poprzez wprowadzenie dodatkowego pierścienia zwierającego i skręcenie obu połówek wirnika o kąt równy $\frac{T}{2}$ następuje przesunięcie charakterystyk katowych pasożytniczych momentów synchronicznych związanych odpowiednio z I i II wirnikiem o kąt równy połowie okresu tych charakterystyk, a to prowadzi w konsekwencji do zrównoważenia się momentów synchronicznych i ich wzajemnego wygaszenia. Efekt ten zilustrowano na rys.3.



Rys.3. Charakterystyki katowe pasożytniczych momentów synchronicznych związanych z połówkami wirnika skręconymi o kąt $T/2$

Fig.3. Synchronous parasitic torque - angle θ_0 curves connected with the halves of a rotor turned by the angle $T/2$

W rzeczywistości pierścien dodatkowy posiada skończoną wartość rezystancji i indukcyjności rozproszenia, co oznacza, że nie jest możliwe całkowite wytłumienie pasożytniczego momentu synchronicznego, tak jak to przedstawiono na rys.3. Minimalna wartość, do której można zredukować pasożytniczy moment synchroniczny, związany z parą harmonicznych (ν, ρ) przy zadanej rezystancji R_a i indukcyjności rozproszenia $L_{\sigma a}$ pierścienia dodatkowego, wynika ze wzoru (4).

Rozważmy jako przykład 3-fazowy silnik klatkowy średniej mocy o następujących danych: $P_n = 3$ kW, $U_n = 380$ V, $p=3$, liczba żłobków stojana $Q_s=36$, liczba żłobków wirnika $Q_r=33$.

W silniku tym dominujący synchroniczny moment pasożytniczy powstaje w zakresie pracy hamulcowej i jest związany z parą harmonicznych przesrzedzonych o rzędach $(\nu, \rho)=(3, 69)$ (gdzie: $\nu=3$ - harmoniczna główna, $\rho=69$ - harmoniczna żłobkowa stojana określona wzorem $\rho=cQ_s-p$ dla $c=2$). Prędkość synchroniczna tego momentu wynosi:

$$\omega_s = -\frac{2\omega_o}{\nu-\rho} = -\frac{2\omega_o}{66} = -9.52 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad (10)$$

a okres charakterystyki katowej momentu synchronicznego jest - zgodnie ze wzorem (5) - równy:

$$T = \pi \frac{|\omega_s|}{\omega_o} = 0.0952 \text{ rad.} \quad (11)$$

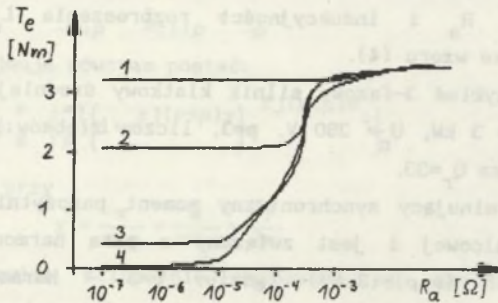
Znaczne ograniczenie wartości pasożytniczego momentu synchronicznego można uzyskać przez wprowadzenie dodatkowego pierścienia zwierającego i wzajemne skrócenie obu połówek wirnika wokół wału o kąt $\gamma = \frac{T}{2} = 0.0476$ rad.

Tablica I.

Moment synchroniczny $T_{e(69,3)}$ [Nm]
 $\gamma = 0.0476$ rad., przypadek z rys. 1c.

$L_{\sigma a}$ [H]	R_a [Ω]	∞	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
∞		3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
10^{-5}		3.44	3.23	3.22	3.22	3.22	3.22
10^{-6}		3.44	3.11	2.08	2.04	2.04	2.04
10^{-7}		3.44	3.27	1.24	0.45	0.44	0.44
10^{-8}		3.44	3.29	1.29	0.15	0.05	0.05
10^{-9}		3.44	3.29	1.30	0.15	0.02	0.01

W tabelicy I przedstawiono wpływ, jaki rezystancja i indukcyjność rozproszenia pierścienia dodatkowego wywiera na amplitudę synchronicznego momentu pasożytniczego, zaś na rys. 4 i 5 scharakteryzowano te zależności



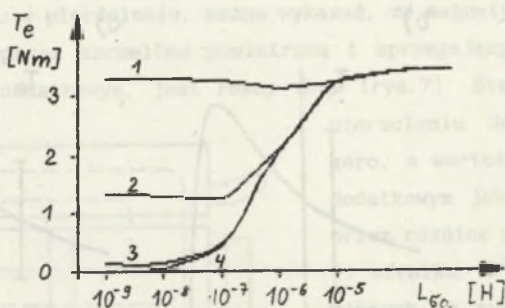
Rys.4. Zależność pasożytniczego momentu synchronicznego $T_{e(69,3)}$ od rezystancji segmentu pierścienia dodatkowego:

- 1) $L_{\sigma a} = 10^{-5} \text{H}$, 2) $L_{\sigma a} = 10^{-6} \text{H}$, 3) $L_{\sigma a} = 10^{-7} \text{H}$, 4) $L_{\sigma a} = 10^{-8} \text{H}$

Fig.4. Relationship between synchronous parasitic torque $T_{e(69,3)}$ and resistance of an additional ring:

- 1) $L_{\sigma a} = 10^{-5} \text{H}$, 2) $L_{\sigma a} = 10^{-6} \text{H}$, 3) $L_{\sigma a} = 10^{-7} \text{H}$, 4) $L_{\sigma a} = 10^{-8} \text{H}$

graficznie za pomocą rodziny krzywych. Jak widać, skuteczność oddziaływania pierścienia dodatkowego na momenty synchroniczne w istotny sposób zależy od wartości obu tych parametrów. Właściwe działanie pierścienia dodatkowego wymaga, aby zarówno rezystancja pierścienia, jak i jego indukcyjność rozproszenia były mniejsze od pewnych wartości krytycznych R_{akr} i $L_{\sigma akr}$. Jeżeli przykładowo $R_a < 10^{-6} \Omega$ oraz $L_{\sigma a} < 10^{-8} \text{H}$, wówczas wartość amplitudy momentu synchronicznego spada poniżej 1.5% wartości, jaką moment ten przyjmuje w silniku bez pierścienia dodatkowego, a więc - moment jest praktycznie wygaszony. Jeśli jednak $R_a > 10^{-3} \Omega$ lub $L_{\sigma a} > 10^{-5} \text{H}$, wówczas - pomimo wprowadzenia pierścienia i odpowiedniego skreślenia połówek - moment synchroniczny pozostaje praktycznie niezmienny.



Rys.5. Zależność pasożytniczego momentu synchronicznego $T_{e(69,3)}$ od indukcyjności rozproszenia segmentu pierścienia dodatkowego:

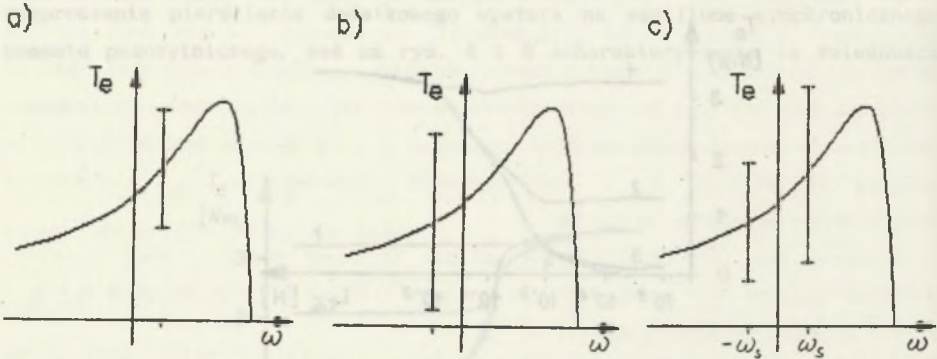
- 1) $R_a = 10^{-3} \Omega$, 2) $R_a = 10^{-4} \Omega$, 3) $R_a = 10^{-5} \Omega$, 4) $R_a = 10^{-6} \Omega$

Fig.5. Relationship between synchronous parasitic torque $T_{e(69,3)}$ and leakage inductance of an additional ring:

- 1) $R_a = 10^{-3} \Omega$, 2) $R_a = 10^{-4} \Omega$, 3) $R_a = 10^{-5} \Omega$, 4) $R_a = 10^{-6} \Omega$

Wartość rezystancji i indukcyjności rozproszenia pierścienia dodatkowego kształtuje się poprzez dobór odpowiednich wymiarów geometrycznych żłobka. Żłobek, w którym jest umieszczony pierścień dodatkowy, jest żłobkiem prostokątnym otwartym. Przy zadanej wysokości żłobka rezystancję i indukcyjność rozproszenia można pomniejszać poprzez powiększanie jego szerokości, pociąga to jednak za sobą konieczność zwiększenia długości maszyny. Stąd też istotne jest określenie dla projektowanej maszyny - wzór (4) i schemat zastępczy maszyny - wartości krytycznej rezystancji i indukcyjności pierścienia dodatkowego i przyjęcia wymiarów żłobka odpowiadających wartościom nieznacznie tylko mniejszym od krytycznych.

Reasumując, poprzez wprowadzenie dodatkowego pierścienia zwierającego w środek pakietu żelaza wirnika, właściwy dobór jego parametrów oraz wzajemne skrócenie połówek wirnika o odpowiednio dobrany kąt można praktycznie całkowicie wyłumić wszystkie pasożytnicze momenty synchroniczne, które posiadają jednakowy okres charakterystyki kątowej. Oznacza to, że za pomocą dodatkowego pierścienia można wyeliminować momenty synchroniczne w silniku we wszystkich przypadkach przedstawionych na rys. 6. W przypadku gdy pasożytniczy moment synchroniczny powstaje przy prędkości $\omega_s = 0$ i zawiera składowe o różnych okresach charakterystyki kątowej, tak jak to



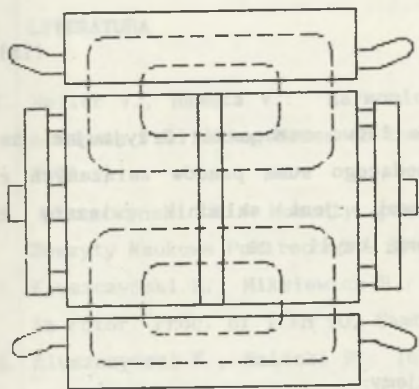
Rys. 6. Rozkłady pasożytniczych momentów synchronicznych, przy których możliwe jest ich wygaszenie

Fig. 6. Distributions of synchronous parasitic torques at which is possible to suppress them

przedstawiono np. na rys. 2, możliwe jest wygaszenie tylko jednej z tych składowych. Podobnie w przypadku gdy pasożytnicze momenty synchroniczne powstają przy dwóch lub więcej prędkościach synchronicznych, pierścień dodatkowy pozwala na wytlumienie tylko jednego z tych momentów.

Istotną zaletą przedstawionego sposobu wytlumiania momentów pasożytniczych za pomocą pierścienia dodatkowego jest to, że jest on skuteczny zarówno w silnikach indukcyjnych z klatką izolowaną, jak i nieizolowaną, a więc - że prądy poprzeczne, płynące pomiędzy prętami klatki poprzez żelazo wirnika, nie osłabiają tłumiącego działania pierścienia dodatkowego. Jest to istotna zaleta omówionej metody w porównaniu do sposobu polegającego na wprowadzeniu ukośnych żłobków w wirniku. W silnikach indukcyjnych z klatką nieizolowaną, a zwłaszcza w przypadku silników z klatką zalewaną aluminium, wprowadzenie skosu żłobków prowadzi do silnego wzrostu prądów poprzecznych, a te zaś - do silnego osłabienia wpływu skosu na momenty pasożytnicze i - w konsekwencji - do znacznego ograniczenia skuteczności metody. Celowe wydaje się natomiast łączenie obu wymienionych sposobów - dodatkowego pierścienia oraz skosu żłobków - w jednej maszynie, tak jak to przedstawiono na rys. 1b, c. Stwarza to możliwość, aby niektóre z momentów pasożytniczych redukować poprzez wprowadzenie pierścienia dodatkowego, inne zaś - za pomocą skosu żłobków wirnika. Pamiętać jednak należy o tym, że wartość skosu należy wybrać i obliczyć w stosunku do połowy długości wirnika, a więc dla połówki wirnika, a nie w odniesieniu do całej długości wirnika.

Przy doborze pierścienia dodatkowego konieczna jest również znajomość gęstości prądu w pierścieniu. Można wykazać, że magnetyczny strumień osiowy, przenikający przez szczelinę powietrzną i sprzęgający uzwojenie stojana z pierścieniem dodatkowym, jest równy zero (rys.7). Stąd też prąd oczkowy w



Rys.7. Silnik z dodatkowym pierścieniem zwierającym

Fig.7. Motor with additional ring

prąd w segmencie wspólnym dla pierwszego oczka I wirnika i pierwszego oczka II wirnika związany z ν -tą harmoniczną przestrzenna jest określony wzorem:

$$I_{av11} = \frac{\sin \frac{\nu\gamma}{2}}{\sin \frac{\nu\alpha_r}{2}} I_{bv} \quad (12)$$

gdzie:

I_{bv} - prąd pręta związany z ν -tą harmoniczną przestrzenna,

$$\alpha_r = \frac{2\pi}{Q_r}$$

oraz w segmencie wspólnym dla pierwszego oczka I wirnika i drugiego oczka II wirnika - wzorem:

$$I_{av12} = \frac{\sin \frac{\nu(\alpha_r - \gamma)}{2}}{\sin \frac{\nu\alpha_r}{2}} I_{bv} \quad (13)$$

W przypadku skręcenia obu połówek wirnika o odcinek $a = \frac{\tau_r}{2c}$, które to skręcenie zapewnia stłumienie pasożytniczego momentu synchronicznego o okresie charakterystyki kątowej $\frac{\tau_r}{c}$, prądy te przyjmują wartości:

$$I_{av11} = \frac{\sin\left(\frac{1}{2c} \frac{v\pi}{Q_r}\right)}{\sin \frac{v\pi}{Q_r}} I_{bv'} \quad (14)$$

$$I_{av12} = \frac{\sin\left(\frac{2c-1}{2c} \frac{v\pi}{Q_r}\right)}{\sin \frac{v\pi}{Q_r}} I_{bv'} \quad (15)$$

Wartości obu tych prądów można stosunkowo łatwo oszacować. Przyjmując, że dominującym składnikiem prądu wirnika, będącego sumą prądów związanych z poszczególnymi harmonicznymi przestrzennymi, jest składnik związany z harmoniczną główną (pracującą) o rzędzie $v=p$, czyli - że:

$$I_{a11} \cong I_{ap11}$$

$$I_{a12} \cong I_{ap12}$$

oraz zakładając, że: $\cos \frac{p\pi}{2cQ_r} \cong 1$ - otrzymujemy:

$$\begin{aligned} I_{a11} &\cong \frac{1}{2} I_{bp} \quad \text{i} \quad I_{a12} \cong \frac{1}{2} I_{bp}, \quad \text{jeśli } c=1, \\ I_{a11} &\cong \frac{1}{4} I_{bp} \quad \text{i} \quad I_{a12} \cong \frac{3}{4} I_{bp}, \quad \text{jeśli } c=2, \\ I_{a11} &\cong \frac{1}{6} I_{bp} \quad \text{i} \quad I_{a12} \cong \frac{5}{6} I_{bp}, \quad \text{jeśli } c=3 \quad \text{itd.}, \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie I_{bp} - prąd pręta związany z p -tą (główną) harmoniczną przestrzenną.

W rzeczywistości prądy w obu segmentach pierścienia dodatkowego będą o kilka do kilkunastu procent większe od podanych wartości szacunkowych. Znajomość powyższych wzorów pozwala skontrolować prawidłowość doboru wymiarów pierścienia dodatkowego ze względów cieplnych.

5. WNIOSKI

Dodatkowy pierścień zwierający w środku pakietu rdzenia wirnika jest skutecznym środkiem pozwalającym na wytlumienie wybranych pasożytniczych momentów synchronicznych w indukcyjnym silniku klatkowym, w którym - ze względów technologiczno-ekonomicznych - nie można było uniknąć pasożytniczych momentów synchronicznych poprzez inny dobór liczby zębów stojana i wirnika. Dla prawidłowego działania pierścienia dodatkowego konieczne jest wprowadzenie odpowiedniego kąta skręcenia obu połówek wirnika (o kąt równy połowie okresu charakterystyki katowej tłumionego momentu

synchronicznego) oraz dobór odpowiednich wymiarów geometrycznych pierścienia (rezystancja i indukcyjność rozproszenia pierścienia dodatkowego muszą być mniejsze od pewnej wartości krytycznej).

LITERATURA

1. Heller V., Hamata V.: Harmonic Field Effects in Induction Machines. Academia Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague 1977.
2. Kluszczyński K.: Momenty pasożytnicze w maszynach asynchronicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, z.102., Gliwice 1986.
3. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Squirrel-cage motor with additional ring in rotor. Proc. of ICEM'90, Cambridge, Massachusetts, USA, 1990
4. Kluszczyński K., Malicki P.: Influence of bar-to-bar transverse currents on parasitic torques in squirrel cage motor. Proc. of CICEM-91, Wuhan, China 1991.
5. Krzywiński L.: Wpływ nieizolowania klatki na asynchroniczne momenty pasożytnicze w silnikach indukcyjnych. Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 32, Warszawa 1963.
6. Sobczyk T., Kielski T.: Analiza wpływu pierścienia pośredniego na własności silnika klatkowego. Elektrotechnika - kwartalnik AGH, T.6, z.2,3, 1987

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Eugeniusz Koziej

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 marca 1992 r.

CHOICE OF ADDITIONAL RING IN THE MIDST OF ROTOR CORE IN SQUIRREL-CAGE MOTOR

A b s t r a c t

Synchronous parasitic torques arising in induction motors deform the torque-speed curve and deteriorate considerably dynamic properties of a motor at starting and reversals. One of effective methods for suppressing chosen synchronous parasitic torque is an additional ring in the midst of a

rotor dividing the rotor into two halves turned mutually around a shaft by the certain angle γ (Fig.1). These two halves can be treated as two separate rotors: rotor I and rotor II having one ring in common.

The value of parasitic synchronous torque at the synchronous speed ω_s depends on the angle θ_0 (where: θ_0 - the angle between the axis of the 1-th stator phase winding and the axis of the 1-th mesh of a rotor cage at the time instant when steady-state occurs), which plays the same role as the so-called power angle in the theory of a synchronous machine (Exp.4). The synchronous parasitic torque - angle θ_0 curve is sinusoidal if synchronous speed is situated in the brake or motor region and, in general, non-sinusoidal if synchronous torque arises at standstill (Fig.2). The period T of synchronous torque - angle θ_0 curve is equal to τ_r/c (where: τ_r - rotor slot pitch, c - integer number) and is related to the value of synchronous speed (Exp.5).

In the motor having an additional ring electromagnetic torque arises as a result of a stator current I_s acting upon the currents of rotor I and rotor II which means that the torque - angle θ_0 curve of synchronous torque is the sum of the two torque - angle θ_0 curves but shifted mutually by the angle γ (Exp.4). If the angle γ is equal to the half of the period T_s of the torque - angle θ_0 curve (Exp.9) then parasitic synchronous torque connected with rotor I will suppress synchronous torque connected with rotor II and synchronous parasitic torque will be remarkably reduced (Fig.3). It is to be noticed that the minimum value of the reduced torque depends on the resistance and leakage inductance of an additional ring which must be less than the certain critical values (Table I, Figs.4 and 5). Because of the fact that axial magnetic flux and, as a consequence, the mesh current of an additional ring equals zero (Fig.7), the currents in the various segments of an additional ring (there are possible three different cases presented in Fig.1a,b,c) are equal to the difference of mesh current associated with rotor I and rotor II - and are finally determined by Exps.14 and 15.