

Andrzej GIOSKA
Zbigniew RYCZKO

STRUMIEN UNIPOLARNY W MASZYNACH INDUKCYJNYCH

Streszczenie. Podczas produkcji maszyn elektrycznych występują różne niedokładności technologiczne, a mianowicie: niesymetryczne rozłożenie uzwojeń stojana i wirnika, niesymetryczne połączenia czołowe tych uzwojeń, niejednorodność materiałów czynnych uzwojeń stojana i klatek wirnika, magnetyczna anizotropia blach twornikowych, przesunięcie blach wirnika względem wału wirnika, niekoncentryczne ustawienie wirnika względem pakietu blach stojana. W rezultacie powstają niepożądane strumienie unipolarne o różnych częstotliwościach.

W artykule przeanalizowano przyczyny powstawania strumienia unipolarnego. Wyprowadzono ogólne zależności opisujące wpływ harmonicznych przestrzennych indukcji w szczelinie powietrznej i harmonicznych przestrzennych zmienności szczeliny powietrznej na wywołanie strumienia unipolarnego.

Omówiono podstawowe przypadki występowania zmienności szczeliny powietrznej oraz ich wpływ na częstotliwość strumienia unipolarnego dla maszyn o różnej liczbie par biegunów.

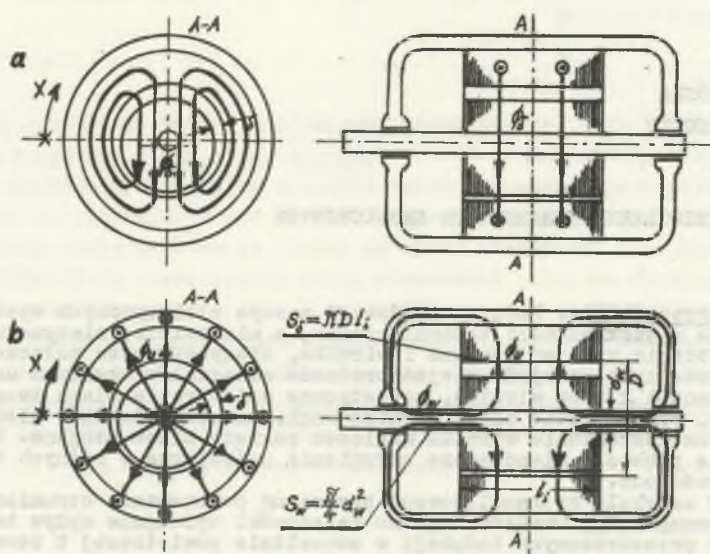
1. Wstęp

W niektórych przypadkach w maszynach indukcyjnych oprócz strumienia głównego Φ_{δ} pojawia się strumień unipolarny Φ_u . Strumień unipolarny zamyka się przez szczelinę powietrzną, pakiet blach wirnika, wał wirnika, łożyska, tarczycę łożyskową, korpus stojana i pakiet blach stojana, a strumień główny zamyka się przez szczelinę powietrzną, pakiet blach wirnika, szczelinę powietrzną i pakiet blach stojana (rys. 1).

Przyczyną występowania strumienia unipolarnego jest niedokładność w idealnie koncentrycznym ustawieniu wirnika względem pakietu blach stojana oraz niemożliwość zapewnienia idealnego symetrycznego rozkładu uzwojeń stojana i wirnika.

Stosując odpowiednią technologię, można zmniejszyć te niedokładności wykonawcze. Nie można jednak całkowicie wyeliminować ekscentrycznego przesunięcia wirnika względem otworu stojana oraz pakietu blach wirnika względem wału wirnika.

Do innych niedokładności produkcji silników indukcyjnych można również zaliczyć niejednorodność materiału używanego na uzwojenia stojana i klatki wirnika oraz magnetyczną anizotropię blach twornikowych.



Rys. 1. Obwód magnetyczny

a) strumienia głównego Φ_{δ} , b) strumienia unipolarnego Φ_u

Fig. 1. The magnetic circuit of

a) air gap main flux Φ_{δ} , b) unipolar flux Φ_u

Strumienie unipolarne przenikające wał wirnika wywołują siły radialne działające na wirnik; jednak nie wpływają na charakterystykę mechaniczną silnika indukcyjnego.

Strumień unipolarny może być również przyczyną powstawania prądów żożyskowych (niszczących bieżnię łożysk) i prądów wirowych w łożyskach (powodujących nadmierny przyrost temperatury łożysk).

Niesymetryczne połączenie czołowe uzwojeń stojana wywołują strumień unipolarny o częstotliwości sieciowej (ω_N), a niesymetria układu połączeń zwojów wirnika pierścieniowego wywołuje strumień o częstotliwości poślizgu ($s\omega_N$).

Również w silnikach klatkowych można stwierdzić występowanie strumienia w wale o częstotliwości poślizgu.

2. Przyczyny powstawania strumienia unipolarnego w maszynach indukcyjnych

W stanie pracy ustalonej całkowity rozkład przestrzenno-czasowy przepływu $\psi(x, t)$ maszyny po rozłożeniu na nieskończony szereg Fouriera opisany jest równaniem:

$$\psi(x, t) = \psi_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_{\max}^n \cos(nx - \omega_{\psi}^n t - \varphi_{\psi}^n) \quad (2.1)$$

a zmienna w ogólnym przypadku szczelina powietrzna $\delta(x, t)$ między stojanem a wirnikiem maszyny po rozłożeniu na nieskończony szereg Fouriera wyrażona jest przez:

$$\delta(x, t) = \delta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \delta_{\max}^m \cos(mx - \omega_{\delta}^m t - \varphi_{\delta}^m) \quad (2.2)$$

przy czym: $\psi_0(t)$ - przepływ zmienny odpowiadający wymuszeniu od cewki nawiniętej na wale (w maszynach indukcyjnych nie występują cewki nawinięte na wale maszyny); δ_0 - średnia szczelina powietrzna z uwzględnieniem współczynnika Cartera, w której uwzględniono też spadki napięcia magnetycznego w ferromagnetycznych częściach obwodu magnetycznego maszyny; $\Theta_{\max}^n \delta_{\max}^m$ - amplitudy odpowiednio n-tej i m-tej harmonicznej przestrzennej przepływu (działającego w szczelinie) i rozkładu przestrzennego szczeliny powietrznej; $\omega_{\psi}^n, \omega_{\delta}^m$ - pulsacja odpowiednio n-tej i m-tej harmonicznej przepływu $\psi(x, t)$ i zmienności szczeliny powietrznej $\delta(x, t)$; $\varphi_{\psi}^n, \varphi_{\delta}^m$ - kąty przestrzennego położenia osi odpowiednio n-tej i m-tej harmonicznej przepływu $\psi(x, t)$ i szczeliny powietrznej $\delta(x, t)$.

Całkowity rozkład przestrzenny $\psi(x, t)$ opisany równaniem (2.1) działający w szczelinie powietrznej $\delta(x, t)$ o równaniu (2.2) wytworzy strumień magnetyczny w szczelinie Φ_{δ} o rozkładzie przestrzenno-czasowym indukcji $b_{\delta}(x, t)$ dany (po rozłożeniu na nieskończony szereg Fouriera) równaniem:

$$b_{\delta}(x, t) = b_{\delta 0}(t) + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\delta}^{\nu} \cos(\nu x - \omega_b^{\nu} t - \varphi_b^{\nu}) \quad (2.3)$$

oraz wytworzony strumień magnetyczny Φ_w w przekroju wału S_w o rozkładzie przestrzenno-czasowym indukcji $b_w(x, t)$ dany również równaniem:

$$b_w(x, t) = b_{w 0}(t) + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_w^{\nu} \cos(\nu x - \omega_b^{\nu} t - \varphi_b^{\nu}) \quad (2.4)$$

przy czym: $b_{\delta 0}(t), b_{w 0}(t)$ - składowe przemienne indukcji odpowiednio w szczelinie i w wale; $B_{\delta}^{\nu}, B_w^{\nu}$ - amplitudy ν -tej harmonicznej przestrzennej indukcji odpowiednio w szczelinie powietrznej i w wale; $\omega_b^{\nu}, \varphi_b^{\nu}$ - odpowiednio pulsacja i kąt przestrzennego położenia osi pola ν -tej harmonicznej przestrzennej indukcji w szczelinie powietrznej $b_{\delta}(x, t)$ oraz w wale $b_w(x, t)$.

Strumień główny Φ_{δ} zamykający się przez szczelinę powietrzną, pakiet blach wirnika, szczelinę powietrzną i pakiet blach stojana (rys. 1a) jest ściśle związany ze szczeliną $\delta(x, t)$. Natomiast strumień magnetyczny w wale Φ_w mający inną drogę zamknięcia (przez szczelinę powietrzną, pakiet blach wirnika, wał wirnika, łożyska, tarcze łożyskowe, korpus stojana i pakiet blach stojana) jest częściowo związany ze szczeliną powietrzną $\delta(x, t)$ i ma zastępczą drogę zamknięcia δ_w^v różną dla różnych harmonicznych przestrzennych indukcji, dając jednocześnie tę samą zawartość harmonicznych w rozkładzie $b_w(x, t)$ jak w rozkładzie $b_{\delta}(x, t)$ lecz z różnymi ich udziałami. Zatem podobieństwo równań (2.3) i (2.4) jest uzasadnione.

Składowe przemienne indukcji w wale $b_{w0}(t)$ z równania (2.4) są spowodowane strumieniem unipolarnym o zastępczej drodze zamknięcia δ_{w0} (rys. 1b) przedstawia tę drogę tylko dla jednego przekroju maszyny).

Równania (2.1), (2.2), (2.3) i (2.4) przedstawiają biegnące fale odpowiednio dla przepływu, zmienności szczeliny powietrznej, indukcji w szczelinie powietrznej i w wale, jako odpowiednie sumy poszczególnych harmonicznych określonych przez ich rzędy (odpowiednie n, m i v) oraz przez ich prędkości kątowe związane z płaszczyzną maszyny (odpowiednio $\frac{1}{n}\omega_{\delta}^n$, $\frac{1}{m}\omega_{\delta}^m$ i $\frac{1}{v}\omega_b^v$) przy ich czasowo-przestrzennym przyporządkowaniu uwzględnionym przez kąty (odpowiednio φ_{δ}^n , φ_{δ}^m i φ_b^v).

Uwzględniając wszystkie spadki napięć magnetycznych (rys. 1a i 1b) występujące w maszynie [1], otrzymuje się:

$$\frac{b_{\delta}(x, t)}{\mu_0} \delta(x, t) + \frac{b_{w0}(t)}{\mu_0} \delta_{w0} + \frac{1}{\mu_0} \sum_{v=1}^{\infty} \delta_w^v B_w^v \cos(vx - \omega_b^v t - \varphi_b^v) = \psi(x, t) \quad (2.5)$$

Wstawiając równania (2.1), (2.2), (2.3) i (2.4) do równania (2.5) po odpowiednim przekształceniu otrzymuje się równanie:

$$\begin{aligned} & \delta_{w0} b_{w0}(t) + \delta_0 b_{\delta 0}(t) + \sum_{v=1}^{\infty} (\delta_w^v B_w^v + \delta_0 B_{\delta}^v) \cos(vx - \omega_b^v t - \varphi_b^v) + b_{\delta 0}(t) \sum_{\max}^m \cos(mx - \omega_{\delta}^m t - \varphi_{\delta}^m) + \\ & + \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{B_{\delta}^v \delta_0^m}{2\mu_0} \left\{ \cos[(v+m)x - (\omega_b^v + \omega_{\delta}^m)t - (\varphi_b^v + \varphi_{\delta}^m)] + \right. \\ & \left. + \cos[(v-m)x - (\omega_b^v - \omega_{\delta}^m)t - (\varphi_b^v - \varphi_{\delta}^m)] \right\} = \mu_0 \psi_0(t) + \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_{\max}^n \cos(nx - \omega_{\delta}^n t - \varphi_{\delta}^n). \quad (2.6) \end{aligned}$$

Porównując lewą i prawą stronę równania (2.6) dla różnej kombinacji występowania n , m i ν , można wyciągnąć odpowiednie wnioski warunkujące pojawienie się strumienia unipolarnego w maszynach indukcyjnych.

Zakładając $n \neq 0$ oraz $\nu \neq 0$ można rozróżnić dwa przypadki występowania indukcji unipolarnej $b_{w0}(t)$:

a) Przypadek, gdy $|\nu| \neq |m|$.

Zatem, gdy wszystkie rzędy harmonicznych indukcji w szczelinie powietrznej i harmonicznych zmienności szczeliny powietrznej są różne, to na podstawie równania (2.6) można wyznaczyć zależność:

$$\delta_{w0} \cdot b_{w0}(t) + \delta_0 b_{\delta_0}(t) = \mu_0 \psi_0^{\nu}(t). \quad (2.7)$$

Ponieważ składowa przemienna indukcji w wale $b_{w0}(t)$ jest związana z przekrojem poprzecznym wału S_w , a indukcja unipolarna (składowa przemienna indukcji w szczelinie) $b_{\delta_0}(t)$ z boczną powierzchnią wewnętrzną walca stojana S_{δ} , strumień unipolarny $\Phi_u(t)$ wychodzący przez oba końce wału maszyny przy założeniu bezźródłowości pola można wyrazić równaniem:

$$\Phi_u(t) = S_{\delta} b_{\delta_0}(t) = 2S_w b_{w0}(t). \quad (2.8)$$

Podstawiając równanie (2.8) do równania (2.7) otrzymuje się równanie:

$$b_{w0}(t) = \frac{\mu_0 \psi_0^{\nu}(t)}{\delta_{w0} + 2 \frac{S_w}{S_{\delta}} \delta_0}. \quad (2.9)$$

Z równania (2.9) wynika, że gdy indukcja w szczelinie powietrznej i zmienność szczeliny powietrznej są różnego rzędu, to strumień unipolarny wystąpi tylko wtedy, gdy istnieje przepływ zmienny $\psi_0^{\nu}(t)$ od cewki nawiniętej na wale.

b) Przypadek, gdy $|\nu| = |m|$.

W tym przypadku, gdy rzędy harmonicznych indukcji w szczelinie powietrznej i harmonicznych zmienności szczeliny powietrznej są równe, to na podstawie równania (2.6) można tym razem wyznaczyć zależność dla ν -tej harmonicznej:

$$\delta_{w0} b_{w0}(t) + \delta_0 b_{\delta_0}(t) + \frac{1}{2} B_{\delta}^{\nu} \delta_{\max}^{\nu} \cos(\omega_0^{\nu} t + \varphi_0^{\nu}) = \mu_0 \psi_0^{\nu}(t) \quad (2.10)$$

przy czym wprowadzone zostały częstotliwości kątowne ω_0^{ν} oraz kąty fazowe φ_0^{ν} strumienia unipolarnego dla ν -tej harmonicznej według relacji:

$$\varepsilon_{00}^v = \begin{cases} \omega_b^v - \omega_\delta^v & \text{dla } v = m \\ \omega_b^v + \omega_\delta^v & \text{dla } v = -m \end{cases} \quad (2.11)$$

oraz

$$\varphi_{00}^v = \begin{cases} \varphi_b^v - \varphi_\delta^v & \text{dla } v = m \\ \varphi_b^v + \varphi_\delta^v & \text{dla } v = -m \end{cases} \quad (2.12)$$

Podstawiając równanie (2.8) do równania (2.10) otrzymuje się równanie dla v -tej harmonicznej:

$$b_{w0}(t) = - \frac{B_\delta^v \delta_{\max}^v}{2(\delta_{w0}^v + 2 \frac{S_N}{S_\delta} \delta_0^v)} \cos(\omega_0^v t + \varphi_0^v) + \frac{\mu_0 \psi_0^v(t)}{\delta_{w0}^v + 2 \frac{S_N}{S_\delta} \delta_0^v} \quad (2.13)$$

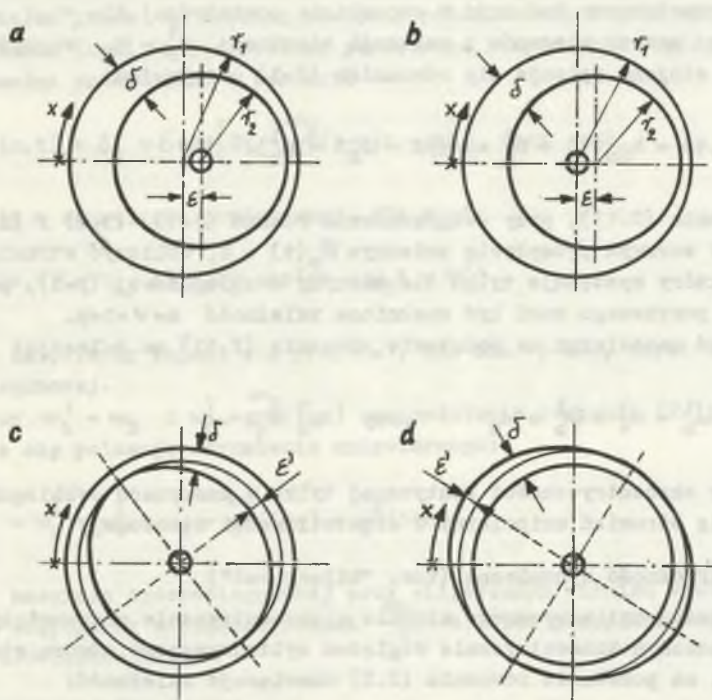
Z równania (2.13) wynika, że gdy indukcja w szczelinie powietrznej i zmienność szczeliny powietrznej są równego rzędu, to powstaje wówczas dodatkowe unipolarnie napięcie magnetyczne dające odpowiednią indukcję unipolarną (pierwszy człon równania (2.13)) i w konsekwencji strumień unipolarny; nawet wtedy, gdy nie istnieje przepływ zmienny od cewki nawiniętej na wał, tzn. gdy $\psi_0^v(t) = 0$. Strumień unipolarny zanika do zera, gdy amplitudy poszczególnych harmonicznych przestrzennych zmienności szczeliny powietrznej $\delta_{\max}^v \rightarrow 0$ lub gdy wał maszyny jest izolowany magnetycznie.

3. Podstawowe przypadki zmienności szczeliny powietrznej prowadzące do powstania strumienia unipolarnego

Różne niedokładności powstające w fazie produkcji silników są źródłem powstania strumienia unipolarnego [2]. Nawet bardzo niewielkie przesunięcie ekscentryczne wału względem wirnika czy też wirnika względem stojana maszyny indukcyjnej, gdzie - jak wiadomo - szczelina powietrzna musi być możliwie najmniejsza, może spowodować powstanie znacznego strumienia unipolarnego.

Również niesymetrie połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika [3], jak przedstawiono w punkcie 1, mogą być źródłem powstania strumienia na wale.

Bez dokładnej znajomości obwodu magnetycznego maszyny nie można jednak na podstawie równań podanych w punkcie 2 obliczyć dokładnie wartości strumienia unipolarnego. Można jedynie ogólnie zbadać (dla kilku przypadków zmienności szczeliny powietrznej) występowanie strumienia unipolarnego



Rys. 2. Typy asymetrycznej szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem

a) Ekscentryczność statyczna, b) Ekscentryczność dynamiczna, c) Eliptyczny wirnik, d) Eliptyczny otwór stojana

Fig. 2. Different types of the asymmetrical air gap between stator and rotor

a) static eccentricity, b) dynamic eccentricity, c) elliptical rotor core, d) elliptical stator core

ograniczając się do największej składowej indukcji w szczelinie, czyli do podstawowej harmonicznej tej indukcji ($\nu = 1$).

a) Ekscentryczność statyczna

W przypadku cylindrycznego wirnika z koncentrycznym wałem przesuniętym ekscentrycznie (ϵ) w cylindrycznym otworze stojana (rys. 2a), szczelinę powietrzną z równania (2.2) można dla $m=1$ i przy przyjęciu $\omega_s^1 = 0$ (ekscentryczność statyczna) opisać równaniem:

$$\delta^1(x, t) = \delta_0 + \delta_{\max}^1 \cos(x - \varphi_s^1) = \delta_0 + \epsilon \cos(x - \varphi_s^1). \quad (3.1)$$

Rozkład przestrzenny indukcji w szczelinie powietrznej dla $\nu=1$ dla maszyny o p parach biegunów i pulsacji sieciowej $\omega_b^1 = \omega_N$ względem nieruchomego stojana opisuje się równaniem (2.3) otrzymując:

$$b_\delta^1(x, t) = b_{\delta_0}(t) + B_\delta^1 \cos(px - \omega_N t - \varphi_b^1). \quad (3.2)$$

Z równania (2.13), przy uwzględnieniu równań (3.1), (3.2) i (2.11), można przy zerowym przepływie zmiennym $\psi_0(t) = 0$, obliczyć strumień unipolarny, który występuje tylko dla maszyny dwubiegunowej ($p=1$), ponieważ w świetle powyższego musi być spełniona zależność $m=\nu=1=p$.

Strumień unipolarny na podstawie równania (2.11) ma pulsację:

$$\omega_o^1 = \omega_b^1 - \omega_\delta^1 = \omega_b^1 = \omega_N \quad \text{przy} \quad \omega_\delta^1 = 0. \quad (3.3)$$

Zatem przy ekscentryczności statycznej tylko w maszynach dwubiegunowych pojawia się strumień unipolarny o częstotliwości sieciowej.

b) Ekscentryczność dynamiczna (tzw. "bijący wał")

W przypadku cylindrycznego wirnika z ekscentrycznie przesuniętym wałem (ε) umieszczonym koncentrycznie względem cylindrycznego otworu stojana (rys. 2b), na podstawie równania (2.2) obowiązuje zależność:

$$\delta^1(x, t) = \delta_o + \delta_{\max}^1 \cos\left[x - \omega_\delta^1 t - \varphi_\delta^1\right] = \delta_o + \varepsilon \cos\left[x - \frac{\omega_N}{p}(1-s)t - \varphi_\delta^1\right]. \quad (3.4)$$

Rozkład przestrzenny indukcji dany jest równaniem (3.2) jak dla ekscentryczności statycznej.

Również w tym przypadku strumień unipolarny może być wywołany tylko w dwubiegunowej maszynie, ponieważ jak w przypadku a) musi być spełniona zależność $m=\nu=1=p$.

Przy $\omega_b^1 = \omega_N$ i $\omega_\delta^1 = \frac{\omega_N}{p}(1-s)$, gdzie s jest poślizgiem, otrzymuje się z równania (2.11) pulsację strumienia unipolarnego:

$$\omega_o^1 = \omega_b^1 - \omega_\delta^1 = \omega_N - \omega_N(1-s) = s\omega_N. \quad (3.5)$$

Zatem przy ekscentryczności dynamicznej tylko w maszynach dwubiegunowych pojawi się strumień unipolarny o częstotliwości poślizgu. Powstające w maszynach dwubiegunowych strumienie unipolarne o częstotliwości sieciowej i częstotliwości poślizgu dla przypadku a) i b), nie mogą jednak być sprawdzone doświadczalnie, ponieważ niezależnie od tych przypadków (ekscentryczne przesunięcie wirnika względem stojana) występują jeszcze strumienie o tych samych częstotliwościach ω_N i $s\omega_N$ wywołane asymetrią połączeń czołowych odpowiednio stojana i wirnika.

c) Eliptyczny wirnik

Oznaczając przez ε' różnicę pomiędzy półosią dużą a małą elipsy przekroju wirnika (rys. 2c), szczelinę powietrzną przy użyciu współrzędnych stojana można przedstawić w postaci:

$$\delta^2(x, t) = \delta_0 + \varepsilon' \cos\left[2x - \frac{\omega_N}{p}(1-s)t - \varphi_\delta^2\right] \quad \text{przy } m=2 \quad (3.6)$$

a indukcję w szczelinie powietrznej dla $\nu=1$:

$$b_\delta^1(x, t) = b_{\delta_0}^1(t) + B_\delta^1 \cos(px - \omega_N t - \varphi_b^1) \quad (3.7)$$

Strumień unipolarny pojawi się przy $\nu=1$, ale dla $p=m=2$, czyli dla maszyny czterobiegunowej.

Zatem przy $\omega_b^1 = \omega_N$ i $\omega_\delta^1 = \frac{\omega_N}{p}(1-s)$ na podstawie równania (2.11) dla $p=2$ otrzymuje się pulsację strumienia unipolarnego:

$$\omega_0^1 = \omega_b^1 - \omega_\delta^1 = \omega_N - \frac{\omega_N}{2}(1-s) = \frac{\omega_N}{2}(1+s) \quad (3.8)$$

A więc w maszynie czterobiegunowej przy eliptycznym wirniku występuje strumień unipolarny o częstotliwości $\frac{\omega_N}{2}(1+s)$. Ten przypadek można zweryfikować doświadczalnie.

d) Eliptyczny otwór stojana

Oznaczając przez ε' różnicę pomiędzy półosią dużą a małą elipsy otworu stojana (rys. 2d), szczelinę powietrzną przy użyciu współrzędnych stojana można przedstawić w postaci:

$$\delta^2(x, t) = \delta_0 + \varepsilon' \cos(2x - \varphi_\delta^2) \quad \text{przy } m=2 \quad (3.9)$$

Rozkład przestrzenny indukcji dany jest równaniem (3.7) jak dla eliptycznego wirnika.

Zatem strumień w wale ma wówczas częstotliwość:

$$\omega_0^1 = \omega_b^1 - \omega_\delta^1 = \omega_N \quad \text{przy } \omega_\delta^1 = 0 \quad (3.10)$$

W czterobiegunowej maszynie indukcyjnej może powstać strumień unipolarny o częstotliwości sieciowej ω_N i częstotliwości $\frac{\omega_N}{2}(1+s)$ dla przypadku odpowiednio (d) i (c).

Przypadki eliptycznego wirnika (c) i eliptycznego otworu stojana (d) są szczególnie ważne, ponieważ wśród małych i średnich silników, czterobiegunowe maszyny indukcyjne są najczęściej budowane; wykroje blach tych sil-

ników mogą być eliptycznie odkształcone i dlatego strumienie unipolarne o tych częstotliwościach prawie zawsze występują.

Reasumując, przy ekscentrycznie złożonej dwubiegunowej maszynie ($p=1$) pole podstawowe ($\nu=1=p$) w powiązaniu z pierwszą harmoniczną zmienności szczeliny ($m=1$) wywołuje strumień unipolarny.

W podobny sposób powstaje strumień unipolarny stojana dla $m=2$ i $p=2$ (w następstwie eliptycznego uformowania) w wyniku działania podstawowej harmonicznej pola w szczelinie powietrznej ($\nu=1$).

Natomiast zastępcza zmienność szczeliny powietrznej, powstająca wskutek nasycenia zębów, o rzędzie $m=2p$, w ogólnym przypadku nie wywołuje strumienia unipolarnego, ponieważ pole z tą liczbą par biegunów nie występuje.

Również zmienność permeancji wskutek żłobkowania (której liczba par biegunów jest równa liczbie żłobków) stojana bądź wirnika w ogólnym przypadku nie wywołuje strumienia unipolarnego.

LITERATURA

- [1] Jordan H., Taegen F.: Wellenflüsse infolge von Schwankungen des Luftspaltleitwertes ETZ-A Bd.85 (1964) H.26, s. 865-867.
- [2] Jordan H., Röder G.: Fertigungsungenauigkeiten als Ursache von Wellenflüssen bei Asynchronmaschinen. Elektro-Anzeiger, Essen Nr 7 - 7 April 1965, s. 43-45.
- [3] Jordan H., Kovács K.P., Röder G.: Messung des Schlupfes von Asynchronmaschinen mit einer Spule. ETZ-A Bd. 86 (1965) H.9, s. 294-296.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do redakcji dnia 15 czerwca 1987 r.

УНИПОЛЯРНЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОТОК В ИНДУКЦИОННЫХ МАШИНАХ

Р е з ю м е

В производстве электрических машин присутствуют разные технологические отклонения: несимметрические расположения обмоток статора и якоря, несимметрические лобовые соединения обмоток, неоднородность материалов обмоток статора и клеток якоря, магнитная анизотропия стали якоря, перемещение металлических листов якоря относительно вала якоря, некоаксиальное расположение якоря относительно статора. В результате того возникают неупотребляемые магнитные униполярные потоки разных частот. В статье проведен анализ причины возникновения магнитного униполярного потока. Выведены общие соотношения описующие влияние пространственных гармоник индукции в воздушном

зазоре и пространственных гармоник неравномерности воздушного зазора на возникание униполярного магнитного потока. Описаны основные возможности существования переменности воздушного зазора и влияние на частоты униполярного потока в машинах с разным количеством магнитных полюсов.

UNIPOLAR FLUX IN INDUCTION MACHINES

S u m m a r y

When producing electric machines some various technological inaccuracies occur, viz.: asymmetrical distribution of the stator and rotor windings, asymmetrical end connections of these windings, material heterogeneity of the stator windings and rotor cages, magnetic anisotropy of the armature sheets, displacement of the rotor sheets in relation to the rotor shaft, excentric position of the rotor in relation to the stator sheet pack.

In consequence of this undesirable unipolar fluxes of different frequencies are generated. The reasons of the unipolar flux formation have been analysed. General dependences describing the influence of spatial harmonics of the induction in the air gap and spatial harmonics of the air gap deformation on generation of the unipolar flux have been derived.

Some fundamental examples of the air gap deformations and their influence on the uniform flux frequency have been discussed for the machines of different number of poles.