

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechnika ŚląskaHARMONICZNE PRZESTRZENNE PRZEPŁYWU
W MASZYNACH ASYNCHRONICZNYCH

Streszczenie. W wielofazowych symetrycznych uzwojeniach maszyn asynchronicznych można rozłożyć wektory napięć i prądów fazowych na składowe, wytwarzające określone ciągi harmonicznych przestrzennych przepływu. W k-osiowym układzie współrzędnych składowe te odpowiadają parom współrzędnych lub pojedynczym współrzędnym. W stanach ustalonych wiąże się ze składowymi symetrycznymi. Model matematyczny uzwojenia w k-osiowym układzie współrzędnych nazwany schematem rozkładu uzwojenia wielofazowego na uzwojenia elementarne w bezpośredni sposób pozwala wyznaczać widmo krzywej przestrzennej przepływu przy różnym zasilaniu i różnych połączeniach faz.

1. Rozkład ortogonalny wektorów prądów i napięć fazowych maszyny asynchronicznej w stanie nieustalonym

W pracach [2], [3] wykazano, że w wielofazowej symetrycznej maszynie asynchronicznej o gładkiej szczelinie powietrznej i liniowym (nienasyconym) obwodzie magnetycznym jest możliwy rozkład ortogonalny wektorów prądów i napięć fazowych stojana, i wirnika na składowe, generujące określone ciągi harmonicznych przestrzennych przepływu (poła magnetycznego) w szczelinie powietrznej maszyny. Rozkład ten szczególnie dogodnie można przedstawić w k-osiowym układzie współrzędnych, wprowadzanym za pomocą macierzy transformacji:

$$\sqrt{\frac{2}{m}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \alpha & \cos 2\alpha & \dots & \cos (m-1)\alpha \\ \sin 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha & \dots & \sin (m-1)\alpha \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \cos 0 & \cos \frac{m-1}{2}\alpha & \cos 2\frac{m-1}{2}\alpha & \dots & \cos (m-1)\frac{m-1}{2}\alpha \\ \sin 0 & \sin \frac{m-1}{2}\alpha & \sin 2\frac{m-1}{2}\alpha & \dots & \sin (m-1)\frac{m-1}{2}\alpha \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdym = liczba nieparzysta, lub

$$\sqrt{\frac{2}{n}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \alpha & \cos 2\alpha & \dots & \cos (n-1)\alpha \\ \sin 0 & \sin \alpha & \sin 2\alpha & \dots & \sin (n-1)\alpha \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \cos 0 & \cos(\frac{n}{2}-1)\alpha & \cos 2(\frac{n}{2}-1)\alpha & \dots & \cos (n-1)(\frac{n}{2}-1)\alpha \\ \sin 0 & \sin(\frac{n}{2}-1)\alpha & \sin 2(\frac{n}{2}-1)\alpha & \dots & \sin (n-1)(\frac{n}{2}-1)\alpha \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdyn = liczba parzysta,

gdzie:

n - liczba faz uzwojenia,

$$\alpha = \frac{2\pi}{n}$$

albowiem poszczególnym składowym rozkładu ortogonalnego odpowiadają wówczas pary lub pojedyncze współrzędne

$$\begin{bmatrix} w_1^{(k)} \\ w_2^{(k)} \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_3^{(k)} \\ w_4^{(k)} \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ w_{n-2}^{(k)} \\ w_{n-1}^{(k)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ w_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} w_1^{(k)} \\ w_2^{(k)} \\ w_3^{(k)} \\ w_4^{(k)} \\ \vdots \\ w_{n-2}^{(k)} \\ w_{n-1}^{(k)} \\ w_n^{(k)} \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \text{składowa } w_1, w_1^{(k)} + jw_2^{(k)} = \underline{w_1^{(k)}} \\ \text{składowa } w_2, w_3^{(k)} + jw_4^{(k)} = \underline{w_2^{(k)}} \\ \vdots \\ \text{składowa } w_{\frac{n-1}{2}}, w_{n-2}^{(k)} + jw_{n-1}^{(k)} = \underline{w_{\frac{n-1}{2}}^{(k)}} \\ \text{składowa } w_{\frac{n+1}{2}} \end{array} \right\}$$

gdyn = liczba nieparzysta,

lub

$$\begin{matrix}
 \left. \begin{matrix} w_1^{(k)} \\ w_2^{(k)} \\ w_3^{(k)} \\ w_4^{(k)} \\ \vdots \\ w_{n-3}^{(k)} \\ w_{n-2}^{(k)} \\ w_{n-1}^{(k)} \\ w_n^{(k)} \end{matrix} \right\} & \begin{matrix} \text{składowa } w_1, w_1^{(k)} + jw_2^{(k)} = \underline{w}_1^{(k)} \\ \text{składowa } w_2, w_3^{(k)} + jw_4^{(k)} = \underline{w}_2^{(k)} \\ \vdots \\ \text{składowa } w_{\frac{n}{2}-1}, w_{n-2}^{(k)} + jw_{n-2}^{(k)} = \underline{w}_{\frac{n}{2}-1}^{(k)} \\ \text{składowa } w_{\frac{n}{2}} \\ \text{składowa } w_{\frac{n}{2}+1} \end{matrix}
 \end{matrix} \quad (4)$$

gdyn = liczba parzysta.

Jak pokazano powyżej, w miejsce par rzeczywistych współrzędnych k-osio- wych, opisujących poszczególne składowe 2-wymiarowe rozkładu ortogonalne- go, można wprowadzić współrzędne zespolone (wektory uogólnione, wektory przestrzenne).

2. Rozkład ortogonalny wektorów prądów i napięć fazowych maszyny asynchro- nicznej w stanie ustalonym

Niechaj w stanie ustalonym przy niesymetrycznym sinusoidalnym zasilaniu uzwojenia wartościom symbolicznym prądów i napięć fazowych $\underline{w}_1, \underline{w}_2, \dots, \underline{w}_m$ odpowiadają składowe symetryczne $\underline{w}_1^{(1)}, \underline{w}_2^{(1)}, \dots, \underline{w}_m^{(1)}$

$$\begin{bmatrix} \underline{w}_1^{(1)} \\ \underline{w}_2^{(1)} \\ \underline{w}_3^{(1)} \\ \vdots \\ \underline{w}_m^{(1)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{m}} \begin{bmatrix} 1 & a^{n-1} & a^{n-2} & a^{n-3} & \dots & a \\ 1 & a^{n-2} & a^{n-4} & a^{n-6} & \dots & a^2 \\ 1 & a^{n-3} & a^{n-6} & a^{n-9} & \dots & a^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{w}_1 \\ \underline{w}_2 \\ \underline{w}_3 \\ \vdots \\ \underline{w}_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie $a = e^{j\sigma}$.

Można wykazać, że pomiędzy rzeczywistymi i zespolonymi współrzędnymi k-osio- wymi (składowymi rozkładu ortogonalnego) i składowymi symetrycznymi zachodzą następujące relacje:

$$\begin{aligned}
 w_1^{(k)}(t) &= \frac{W_1^{(1)}}{2} e^{j\omega_0 t} + \frac{W_{-1}^{(1)}}{2} e^{-j\omega_0 t} \\
 w_2^{(k)}(t) &= \frac{W_2^{(1)}}{2} e^{j\omega_0 t} + \frac{W_{-2}^{(1)}}{2} e^{-j\omega_0 t} \\
 &\vdots \\
 w_{\frac{n-1}{2}}^{(k)}(t) &= \frac{W_{\frac{n-1}{2}}^{(1)}}{2} e^{j\omega_0 t} + \frac{W_{-\frac{n+1}{2}}^{(1)}}{2} e^{-j\omega_0 t} \\
 w_n^{(k)}(t) &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \frac{W_n^{(1)}}{2} e^{j\omega_0 t}
 \end{aligned} \tag{7}$$

gdy n = liczba nieparzysta
lub

$$\begin{aligned}
 w_1^{(k)}(t) &= \frac{W_1^{(1)}}{2} e^{j\omega_0 t} + \frac{W_{-1}^{(1)}}{2} e^{-j\omega_0 t} \\
 &\vdots \\
 w_{\frac{n}{2}-1}^{(k)}(t) &= \frac{W_{\frac{n}{2}-1}^{(1)}}{2} e^{j\omega_0 t} + \frac{W_{-\frac{n}{2}-1}^{(1)}}{2} e^{-j\omega_0 t} \\
 w_{\frac{n}{2}}^{(k)}(t) &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \frac{W_{\frac{n}{2}}^{(1)}}{2} e^{j\omega_0 t} \\
 w_n^{(k)}(t) &= \sqrt{2} \operatorname{Re} W_n^{(1)} e^{j\omega_0 t}
 \end{aligned} \tag{7}$$

gdy n = liczba parzysta.

Każda składowa 2-wymiarowa rozkładu ortogonalnego jest określona przez dwie składowe symetryczne, zaś 1-wymiarowa - przez jedną składową symetryczną.

3. Schemat rozkładu uzwojenia wielofazowego na uzwojenia elementarne

Podsumowaniem przedstawionych rozważań jest tabela 1, w której zestawiono ciągi harmonicznych przestrzennych przepływu (pola magnetycznego w szczelinie powietrznej) wytwarzanych w stanie nieustalonym przez poszczególne składowe rozkładu ortogonalnego (zespolone i rzeczywiste współrzędne k -osiowe) oraz w stanie ustalonym przez poszczególne składowe symetryczne. Tabelę tę dogodnie można ująć w formę tablicy, której wiersze odpowiadają składowym ortogonalnym rozkładu (3), (4), zaś kolumny - rzędom harmonicznych przestrzennych przepływu. Liczba wierszy równa się liczbie składowych rozkładu ortogonalnego (liczbie zespolonych i rzeczywistych).

Tabela 1

Ciągi harmoniczných przestrzenných przepływu generowane przez poszczególne składowe rozkładu ortogonalnego, współrzędne k-osiowe i składowe symetryczne

ciąg	współrzędne k-osiowe	zespolone współ k-osiowe	składowe symetryczne	rzędy harmoniczných przestrzenných przepływu
1	$w_1^{(k)}$ $w_2^{(k)}$	$\underline{w}_1^{(k)}$	$\underline{w}_1^{(i)}, \underline{w}_{m-1}^{(i)}$	1, m-1, m+1, 2m-1, 2m+1, 3m-1, 3m+1...
2	$w_3^{(k)}$ $w_4^{(k)}$	$\underline{w}_2^{(k)}$	$\underline{w}_2^{(i)}, \underline{w}_{m-2}^{(i)}$	2, m-2, m+2, 2m-2, 2m+2, 3m-2, 3m+2...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$\frac{m-1}{2}$	$w_{m-2}^{(k)}$ $w_{m-1}^{(k)}$	$\underline{w}_{\frac{m-1}{2}}^{(k)}$	$\underline{w}_{\frac{m-1}{2}}^{(i)}, \underline{w}_{\frac{m+1}{2}}^{(i)}$	$m-1, \frac{m+1}{2}, m+\frac{m-1}{2}, 2m-\frac{m-1}{2}, 2m+\frac{m-1}{2}, 3m-\frac{m-1}{2}, \dots$
$\frac{m+1}{2}$	$w_m^{(k)}$	$\underline{w}_m^{(k)}$	$\underline{w}_m^{(i)}$	m, 2m, 3m, 4m...

gdy $m = l$. nieparzysta

1	$w_1^{(k)}$ $w_2^{(k)}$	$\underline{w}_1^{(k)}$	$\underline{w}_1^{(i)}, \underline{w}_{m-1}^{(i)}$	1, m-1, m+1, 2m-1, 2m+1, 3m-1, 3m+1...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$\frac{m}{2}-1$	$w_{m-3}^{(k)}$ $w_{m-2}^{(k)}$	$\underline{w}_{\frac{m}{2}-1}^{(k)}$	$\underline{w}_{\frac{m}{2}-1}^{(i)}, \underline{w}_{\frac{m}{2}+1}^{(i)}$	$\frac{m}{2}-1, \frac{m}{2}+1, m+\frac{m}{2}-1, 2m-\frac{m}{2}+1, 3m+\frac{m}{2}-1, 3m-\frac{m}{2}+1, \dots$
$\frac{m}{2}$	$w_{m-1}^{(k)}$	$\underline{w}_{\frac{m}{2}}^{(k)}$	$\underline{w}_{\frac{m}{2}}^{(i)}$	$\frac{m}{2}, \frac{3}{2}m, \frac{5}{2}m, \frac{7}{2}m, \dots$
$\frac{m}{2}+1$	$w_m^{(k)}$	$\underline{w}_m^{(k)}$	$\underline{w}_m^{(i)}$	m, 2m, 3m, 4m...

gdy $m = l$. parzysta

tych współrzędnych k-osiowych), zaś liczba kolumn - rzędowi najwyższej uwzględnianej w analizie harmoniczných przestrzennej.

Dla przykładu przedstawiono tablice dla 6- i 7-fazowego uzwojenia, uwzględniając w obu przypadkach 18 kolejnych harmoniczných przestrzenných (rys. 1, 2). Tablice te odpowiadają modelowi matematycznemu uzwojeń w k-osiowym układzie współrzędnych [3]. Znak $\underline{\quad}$ symbolizuje symetryczne uzwojenie 2-fazowe o prostopadłych i lewostronnie zorientowanych osiach faz, znak \lfloor - uzwojenie 2-fazowe o prawostronnie zorientacji osi faz zaś znak $|$ - uzwojenie jednofazowe. Każde z tych 2- i 1-fazowych uzwojeń posiada sinusoidalny rozkład krzywej układu prądowego i może wytwarzać tylko jedną harmoniczną przestrzenną przepływu o rzędzie równym numerowi kolumny. Uzwojenia takie będziemy nazywali uzwojeniami elementarnymi. Odpowiadające sobie fazy uzwojeń elementarných, zajmujących ten sam wiersz są

$\frac{p}{k}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$W_1^{(k)}$	┐				┐		┐				┐							
$W_2^{(k)}$		┐											┐				┐	
$W_3^{(k)}$			┐											┐				
$W_4^{(k)}$				┐						┐					┐			
$W_5^{(k)}$								┐							┐			
$W_6^{(k)}$							┐					┐						┐

Rys. 1. Schemat rozkładu uzwojenia 6-fazowego na uzwojenia elementarne

$\frac{p}{k}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$W_1^{(k)}$	┐					┐												
$W_2^{(k)}$													┐					
$W_3^{(k)}$		┐																
$W_4^{(k)}$			┐															
$W_5^{(k)}$				┐														
$W_6^{(k)}$					┐													
$W_7^{(k)}$							┐											

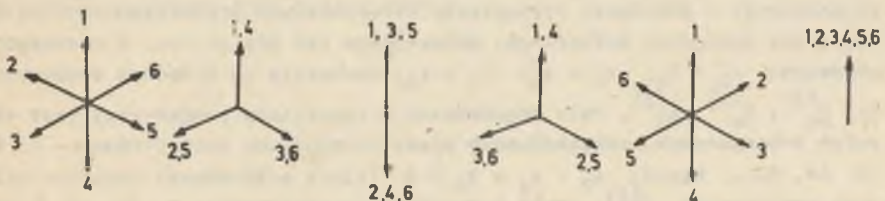
Rys. 2. Schemat rozkładu uzwojenia 7-fazowego na uzwojenia elementarne

szeregowo (galwanicznie) połączone i zasilane kolejnymi współrzędnymi k -osiowymi wektora napięcia. Wszystkie uzwojenia elementarne z danego wiersza tworzą uzwojenie zastępcze dla odpowiedniej składowej rozkładu ortogonalnego (3), (4). Uzwojenia elementarne układają się w obrębie tabeli w cyklicznie powtarzający się charakterystyczny kształt litery V. W przypadku nieparzystej liczby faz wierzchołek litery V jest spłaszczony. Ta regularność w budowie tabel pozwala na ich sporządzenie w sposób mnemotechniczny. Będziemy je nazywać dalej schematami rozkładu uzwojeń na uzwojenia elementarne. Ze schematu rozkładu uzwojenia wielofazowego na uzwojenia elementarne wynika następujący zasadniczy wniosek: wielofazowe uzwojenie symetryczne, (którego poszczególne fazy generują wszystkie harmoniczne przestrzenne przepływu), zasilane kolejnymi składowymi rozkładu ortogonalnego wytwarza pola magnetyczne w szczelinie powietrznej maszyny o rozrzedzonym widmie i różnym rzędzie najniższej harmonicznej przestrzennej. Widmo to jest tym rzadsze, im wyższa jest liczba fazy uzwojenia m . Tak więc zarówno w stanie ustalonym jak i nieustalonym, można poprzez odpowiedni dobór składowej napięcia zasilającego uzwojenie wytwarzać w szczelinie powietrznej pola magnetyczne o różnej liczbie par biegunów i w różny sposób odkształcone przez wyższe harmoniczne przestrzenne przepływu.

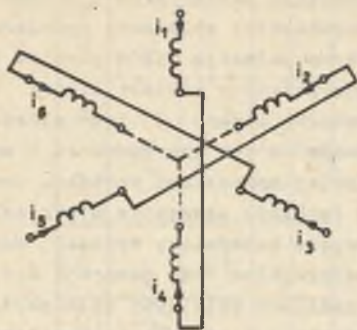
Przedstawione wnioski leżą u podstaw teorii uzwojeń maszyn elektrycznych m.in. w syntetyczny i przejrzysty sposób opisują mechanizm generowania wielobiegunowych pól magnetycznych przez uzwojenia wielofazowe.

4. Przykład

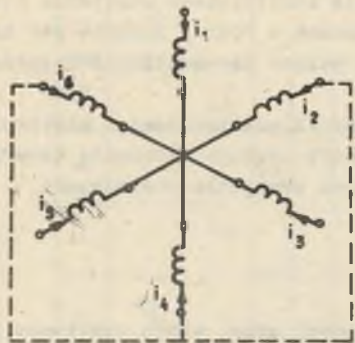
Rozważmy uzwojenie, złożone z 6 jednakowych grup, które traktować będziemy umownie jako uzwojenie 6-fazowe. Zakładamy najogólniejszy przypadek, a mianowicie, że pojedyncza grupa wytwarza wszystkie kolejne harmoniczne przestrzenne przepływu (w rzeczywistości niektóre harmoniczne przestrzenne mogą nie wyetąpić na skutek zerowania się współczynnika skrótu lub grupy). Schemat rozkładu uzwojenia 6-fazowego na uzwojenia elementarne przedstawia rys. 1 (rząd najwyższej uwzględnionej harmonicznej przestrzennej wynosi 18), zaś składowe symetryczne 6-fazowe (rys. 3). Uzwoje-



Rys. 3. Składowe symetryczne 6-fazowe



Rys. 4. Uzwojenie 2-biegunowe



Rys. 5. Uzwojenie 4-biegunowe

nie takie, zasilane pierwszą lub piątą składową symetryczną napięcia wytwarza przepływ zawierający harmoniczne przestrzenne 1, 5, 7, 11, 13, 17... Pole magnetyczne w szczelinie powietrznej jest więc polem 2-biegunowym, odkształconym wyższymi harmonicznymi przestrzennymi: 5, 7, 13, 17... W stanie ustalonym pole kołowe wiruje przeciwnie lub zgodnie z ruchem wskazówek zegara w zależności od tego czy uzwojenie jest zasilane pierwszą, czy też piątą składową symetryczną napięcia. Jeśli to samo uzwojenie zasilimy drugą lub czwartą składową symetryczną, w szczelinie powietrznej powstanie pole 4-biegunowe, odkształcone wyższymi harmonicznymi 4, 8, 10, 14, 16, ... Uzwojenie, zasilane składową symetryczną trzecią lub szóstą wytwarza pole magnetyczne pulsujące odpowiednio 6-biegunowe (odkształcone przez 3, 9, 15... harmoniczną) lub 12-biegunowe (odkształcone przez 6, 12, 18... harmoniczną). Niezależne fazy uzwojeń można łączyć w węzły i oczka, wykluczając w ten sposób możliwość występowania określonych składowych symetrycznych prądu i napięcia. Połączmy fazy uzwojenia 6-fazowego tak, jak to przedstawiono na rys. 4. Równania węzłów przyjmą

postać: $i_1 = -i_4$, $i_2 = -i_5$, $i_3 = -i_6$. Spełniają je prądy składowych symetrycznych: $i_1^{(1)}$, $i_3^{(1)}$, $i_5^{(1)}$. Uzwojenie jest więc uzwojeniem 2-biegunowym, którego rozkład przepływu może być odkształcony wyższymi harmonicznymi - 3, 5, 7, 9, 10, 11, 13, 15, 17... Węzeł (skojarzenie faz w gwiazdę): $i_2 + i_4 + i_6 = 0$, wyklucza składową symetryczną $i_3^{(1)}$ a w konsekwencji - możliwość wystąpienia harmonicznych przestrzennych: 3, 9, 15... Dla uzwojenia 6-fazowego, połączonego tak jak na rys. 5 obowiązują równania: $i_1 = i_4$, $i_2 = i_5$, $i_3 = i_6$. Spełniają je składowe symetryczne: $i_2^{(1)}$, $i_4^{(1)}$, $i_6^{(1)}$. Pole magnetyczne w szczelinie powietrznej jest więc polem 4-biegunowym, odkształconym przez harmoniczne przestrzenne - 4, 8, 10, 14, 16... Węzeł: $i_2 + i_4 + i_6 = 0$ (linia przerywana) wyklucza składową symetryczną $i_6^{(1)}$, czyli harmoniczne przestrzenne: 6, 12, 18... Aby umożliwić porównywanie widm przepływu uzwojeń o niejednakowej liczbie par

biegunów p , rzędy poszczególnych harmonicznym przestrzennym podaje się w odniesieniu do rzędu harmonicznym głównej (pracującej), a więc p -tej:

$$\nu' = \frac{p}{2} \nu$$

Porównajmy widma przepływu uzwojeń z rys. 4 i 5. Dla uzwojenia 2-biegunowego, zasilanego składową $\underline{u}_1^{(1)}$ lub $\underline{u}_5^{(1)}$: $\{\nu'\} = \{\nu\} = 1, 5, 7, 10, 11, 13, 17, \dots$ zaś dla uzwojenia 4-biegunowego zasilanego składową $\underline{u}_2^{(1)}$ lub $\underline{u}_4^{(1)}$: $\{\nu'\} = 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17, \dots$ Widmo uzwojenia 2-biegunowego jest znacznie rzadsze od widma uzwojenia 4-biegunowego, bowiem nie zawiera parzystych harmonicznym przestrzennym. Takie zróżnicowanie widm jest charakterystyczne dla uzwojeń, posiadających odpowiednio jedną lub dwie strefy fazowe na parę biegunów. Uzwojenia jednowarstwowe z jedną strefą na biegun to uzwojenia z grupami pełnymi, zaś z dwoma strefami na biegun - z grupami dzielonymi. Uzwojenia dwuwarstwowe to zazwyczaj uzwojenia z dwoma strefami fazowymi na parę biegunów. Jeden z wyjątków stanowi uzwojenie silnika 2-biegowego (uzwojenie Dahlandera) przy większej z dwóch możliwych liczb par biegunów.

LITERATURA

- [1] Heller B., Hamata V.: Harmonic field effects in induction machines. Academia, Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague 1977.
- [2] Kluszczyński K.: Przestrzenie aktywne i zerowe macierzy indukcyjności w maszynach asynchronicznych przy uwzględnieniu wyższych harmonicznym przestrzennym pola magnetycznego. Prace X Sympozjum nt.: Metody matematyczne w elektrotechnice, Karpacz 1981.
- [3] Kluszczyński K.: Model matematyczny wielofazowej maszyny asynchronicznej. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Elektryka z. 74, Łódź 1983.
- [4] Wach P.: Niesymetrie wewnętrzne maszyn indukcyjnych. Zeszyty Naukowe Elektryka z. 19, WSI, Opole 1982.
- [5] Zembruski J., Kratochwil Z.: Uzwojenia silników indukcyjnych. WNT, Warszawa 1972.

Recenzent: doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do redakcji dnia 2 maja 1984 r.

ВЫСШИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ГАРМОНИКИ МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ В АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ

Резюме

В многофазных симметричных обмотках асинхронных машин можно разложить векторы фазных напряжений и токов на составляющие, которые создают определённые ряды пространственных гармоник магнитодвижущей силы. В k -осевой системе координат эти составляющие соответствуют парам координат или единичным координатам. В установившихся режимах они связаны с симметричными составляющими. Математическая модель обмотки в k -осевой системе координат, названа схемой разложения многофазной обмотки на элементарные катушки, непосредственно делает возможным определить спектр гармоник магнитодвижущей силы при разных питании обмотки и разных соединениях фаз.

MFF SPACE HARMONICS IN ASYNCHRONOUS MACHINES

Summary

In polyphase symmetrical windings of asynchronous machines voltage and current vectors can be decomposed into components, generating the definite sequence of MFF space harmonics. These components correspond to the couple and individual k -axis coordinates. In steady state orthogonal components refer to symmetrical components. Mathematical model of winding in k -axis coordinate system, so-called the diagram of decomposition of winding into elementary windings allows to obtain the spectrum of MFF harmonics in the case of various phase connections.