ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989

Seria: ELEKTRYKA z. 110 Nr kol. 957

Bronisław DRAK

GEOMETRIA I KSZTAŁTOWANIE CZÓŁ UZWOJEŃ STOJANÓW MASZYN INDUKCYJNYCH DUŻYCH MOCY

Streszczenie. Przedstawiono metodę analitycznego wyznaczania geometrii czół cewek dwuwarstwowych uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużych mocy oraz metodę obliczania wymiarów szablonów do kształtowania cewek. Przyjęta linia zarysu stożkowego segmentu czoła cewki jest przestrzennym kładem ewolwenty okręgu na pobocznicę stożka, na której leżą środki przekrojów poprzecznych czoła cewki. Ewolwentę okręgu umiejscowiono na płaszczyźnie przecinającej pobocznicę stożka w okręgu, pokrywającym się z okręgiem podstawowym ewolwenty. Tak przyjęta linia zarysu zapewnia wymaganą równą odległość między bokami czół cewek uzwojenia stojana na całej długości segmentów stożkowych. Algorytm obliczeń zarysu cewek uzwojenia stojana oraz szablonów do ich kształtowania został sprawdzony w pracach projektowych oraz przy wykonaniu cewek uzwojenia stojana silnika indukcyjnego o mocy 1600 kW.

1. Wstęp

Czoła dwuwarstwowych uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużych mocy tworzą dwie powierzchnie stożkowe. Jedną z nich tworzą czoła górnej, a drugą - czoła dolnej warstwy uzwojenia stojana.

Linia, według której kształtuje się czoła uzwojeń, powinna zapewniać stałą odległość między bokami cewek. W praktyce zdarza się, że po niedokładnym ukształtowaniu czół cewek cewki przylegają do siebie w pobliżu wykorbienia po wyjściu ze żłobka stojana, mimo dużej odległości między nimi przy główkach cewek. Nieuzasadnione zmniejszenie tej odległości jest przyczyną wzrostu sił elektrodynamicznych działających na cewki uzwojenia stojana, zmniejszenia wytrzymałości dielektrycznej izolacji uzwojenia oraz pogorszenia warunków chłodzenia czół uzwojenia stojana.

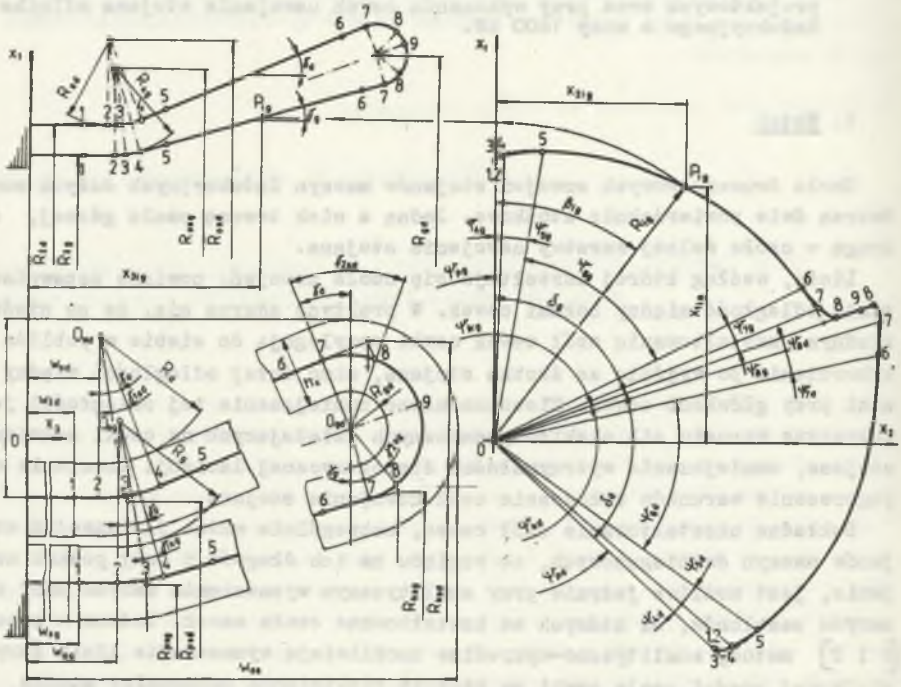
Dokładne ukształtowanie czół cewek, szczególnie ważne dla uzwojeń stojanów maszyn dwubiegunowych, ze względu na ich długość i duży poskok uzwojenia, jest możliwe jedynie przy analitycznym wyznaczeniu zarysu czół oraz zarysu szablonów, na których są kształtowane czoła cewek. Podane w pracach [1 i 2] metody analityczno-wykreślne umożliwiają wyznaczenie linii zarysu stożkowej części czoła cewki na płaskim rozwinięciu pobocznicy stożka, na której mają leżeć środki przekrojów poprzecznych czoła cewki uzwojenia stojana. Metody te nie uwzględniają jednak zmniejszenia założonej odległości między czołami cewek, wynikającego z krzywizny pobocznicy stożka, oraz

występują w nich trudności uwzględnienia rzeczywistego przekroju poprzecznego czoła cewki, które jest niezbędne do dokładnego wyznaczenia zarysu modelu, na którym są kształtowane czoła cewek uzwojenia stojana. Podana poniżej metoda analitycznego wyznaczania geometrii czół oraz geometrii szablonów do kształtowania cewek została sprawdzona w warunkach przemysłowych, przy wykonywaniu uzwojenia stojana silnika SYJd-132t o mocy 1600 kW, dając w pełni pozytywne wyniki.

2. Zasada geometrii czół uzwojenia stojana

Analityczny zapis geometrii czół uzwojenia stojana realizuje się w przestrzennym układzie współrzędnych prostokątnych x_1, x_2, x_3, przyjętym w następujący sposób (rys. 1):

- początek układu współrzędnych przyjmuje się w punkcie przebicia płaszczyzny granicznej pakietu stojana osią podłużną silnika,



Rys. 1. Geometria czoła cewki uzwojenia stojana i podział na i-te segmenty
Fig. 1. Geometry of the end coil of stator winding and division of the stator end coil into parts

- oś x_1 przechodzi przez środek przekroju poprzecznego żłobkowej części górnej półcewki uzwojenia stojana i jest zwrócona na zewnątrz silnika,
- oś x_3 pokrywa się z osią podłużną silnika i jest zwrócona na zewnątrz silnika,
- zwrot osi x_2 jest zgodny ze skrętnością stożkowego segmentu czoła górnej półcewki i dlatego układ współrzędnych może być prawo- lub lewoskrętny.

Przekrój zarysu czół uzwojenia stojana płaszczyzną x_1-x_2 jest określony: wysięgiem żłobkowych segmentów cewki w_{oj} (j=d dla dolnej oraz j=g dla górnej półcewki), wysięgiem promieniowym czół w_p, wysięgiem osiowym czół w_{os}, promieniami R_j i R_{gd} oraz wysokością przekroju poprzecznego czoła cewki h_c. Kąty nachylenia tworzących stożków dolnej i górnej warstwy uzwojenia stojana wyznacza zależność:

$$\gamma_j = \arcsin \frac{x_{o3j} R_{oj} + x_{o1j}\sqrt{x_{o1j}^2 + x_{o3j}^2 - R_{oj}^2}}{x_{o1j}^2 + x_{o3j}^2} \tag{1}$$

w której

$$x_{o1j} = R_{ogd} - R_{osj}$$

$$x_{o3j} = w_{os} - R_{gd} - h_c - w_{oj}$$

$$R_{oj} = R_{sj} \pm R_{sgd}, \quad (- \text{ dla } j=g, \; - \text{ dla } j=d) \tag{1a}$$

oraz

$$R_{sj} = R_j + 0{,}5\, h_c$$

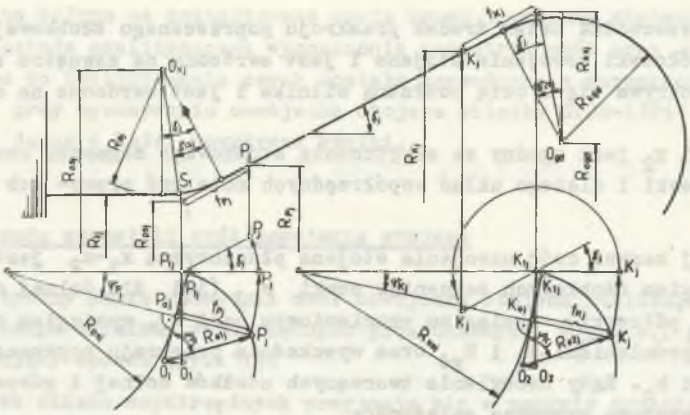
$$R_{sgd} = R_{gd} + 0{,}5\, h_c$$

$$R_{ogd} = R_{żd} + w_p - R_{gd} - h_c$$

$$R_{osj} = R_{żj} + R_{sj} \,. \tag{1b}$$

Wielkości podane we wzorach (1) do (1b) zaznaczono na rys. 1.

Prostoliniowe wysięgi żłobkowych segmentów cewki uzwojenia stojana przechodzą w segmenty stożkowe czoła cewki, poprzez przestrzenne wykorbienie (kolanko) dolnej i górnej półcewki. Wykorbienie średniej linii półcewki jest realizowane dwoma łukami (rys. 2). Pierwszy łuk o promieniu R_{sj} (j=d dla dolnej, j=g dla górnej półcewki) jest styczny do osi wysięgu żłobkowego półcewki oraz do tworzącej stożka, na pobocznicy którego leży średnia linia stożkowego segmentu półcewki. Drugi łuk o promieniu krzywiz-



Rys. 2. Łuki przejścia między segmentami czoła cewki uzwojenia stojana
Fig. 2. Arcs between different parts of the end stator coil

ny R_{e1j} jest styczny do łuku o promieniu R_{sj} oraz do zarysu segmentu stożkowego średniej linii czoła półcewki. Kąt γ_{1sj} (rys. 2), określający położenie punktu styczności tych łuków, zależy od rozwiązania konstrukcyjnego i jest przyjmowany w $\epsilon \langle 0, \gamma_j \rangle$.

Z punktu styczności S_{1j} (rys. 2) łuków, leżącego w płaszczyźnie określonej przez oś wysięgu żłobkowego i tworzącą stożka, prowadzi się prostą prostopadłą do tworzącej stożka. Punkt przecięcia tych prostych P_{1j} przyjmuje się za początek łuku na pobocznicy stożka. Pozostałe punkty tego łuku otrzymuje się przez kład na pobocznicę stożka punktów okręgu o promieniu R_{e1j}, którego średnicę otacza się stycznie po okręgu o promieniu R_{psj}, będącego wynikiem przecięcia pobocznicy stożka płaszczyzną przechodzącą przez punkt P_{1j}. Z zależności trygonometrycznych na rys. 1 promień:

$$R_{psj} = R_{osj} - R_{sj}(\cos\gamma_j + \sin\gamma_j \sin\gamma_{1sj}) \ . \tag{2}$$

W wyniku otaczania średnicy okręgu o promieniu R_{e1j} po okręgu o promieniu R_{psj} łuk $P_{1j}P_{oj}$ jest równy odcinkowi $P_{1j}P_{oj}$. Wobec tego kąt:

$$\Psi_{P_j} = \frac{R_{e1j}}{R_{psj}}(1 - \cos\varphi_{Pj}) \tag{3}$$

a odległość punktu P_j (mierzona po tworzącej stożka) od okręgu o promieniu R_{psj} wynosi:

$$f_{Pj} = R_{e1j} \sin\varphi_{Pj} \tag{4}$$

gdzie φ_{Pj} – kąt wodzący promienia okręgu (rys. 2).

W zakresie kąta γ_{1sj} występuje równoczesne gięcie średniej linii czoła cewki według łuków o promieniach R_{sj} i R_{e1j}. Dlatego w zakresie tego kąta położenie punktów P_j w płaszczyźnie x_1-x_2 układu współrzędnych jest określone przez kąt Ψ_{Pj}, który jest funkcją kąta $\gamma_j \in \langle \gamma_{1sj} \rangle$ oraz promień R_{Pj}, odpowiadający położeniu tego punktu na łuku o promieniu R_{sj}. Od punktu P_j odpowiadającego kątowi γ_j punkty kładu okręgu leżą na pobocznicy stożka i ich położenie jest określane przez kąt φ_{Pj}.

Łuk na pobocznicy stożka, powstały z kładu okręgu, jest także styczny do linii średniej stożkowego segmentu półcewki uzwojenia stojana. Łuk segmentu stożkowego, który szczegółowo został opisany w pracy [3], jest przestrzennym kładem ewolwenty okręgu na pobocznicę stożka, na której leży linia średnia tego segmentu. Ewolwentę okręgu przyjmuje się na płaszczyźnie prostopadłej do osi podłużnej silnika i przecinającej pobocznicę stożka w okręgu pokrywającym się z okręgiem podstawowym ewolwenty.

Średnia linia segmentu stożkowego półcewki przechodzi poprzez łuk przestrzenny o promieniu krzywizny R_{e2j} (rys. 2) w średnią linię główki cewki będącą łukiem o promieniu R_{sgd}. Łuk o promieniu krzywizny R_{e2j} otrzymuje się przez kład okręgu o promieniu R_{e2j} na pobocznicę stożka. Średnica tego okręgu jest otaczana po okręgu o promieniu R_{ksj}, który wyznacza zależność trygonometryczna z rys. 2:

$$R_{ksj} = R_{ogd} \mp R_{sgd}(\cos\gamma_j \mp \sin\gamma_j \sin\gamma_{2sj}) \tag{5}$$

w której znaki górne odpowiadają j=g, a dolne j=d.

Analogicznie do wykorbienia półcewki, kąt:

$$\Psi_{Kj} = \frac{R_{e2j}}{R_{ksj}}(1 - \cos\varphi_{Kj}) \tag{6}$$

oraz

$$f_{Kj} = R_{e2j} \sin\varphi_{Kj} \tag{7}$$

a także w zakresie kąta γ_{2sj} następuje równoczesne gięcie według łuków o promieniach R_{sgd} i R_{e2j}.

3. Linia średnia czół uzwojenia stojana

Czoło cewki uzwojenia stojana dzieli się na czoło górnej półcewki (j=g) oraz czoło dolnej półcewki (j=d). Każdą półcewkę w przestrzeni czół uzwojenia stojana dzieli się na dziewięć i-tych segmentów (rys. 1), przy czym:

i=1 - odcinek od pakietu stojana do wysięgu żłobkowej części cewki z izolacją żłobkową - $w_{żj}$,
i=2 - odcinek równy różnicy odległości w_{oj} środka łuku o promieniu R_j od pakietu stojana i $w_{żj}$,
i=3 - wycinek łuku o promieniu R_{sj} i kącie $(\gamma_j - \gamma_{jsj})$,
i=4 - łuk przestrzenny w zakresie kąta γ_{1sj}, powstały z łuków o promieniach krzywizny R_{sj} i R_{e1j},
i=5 - łuk na pobocznicy stożka o promieniu krzywizny R_{e1j} od punktu odpowiadającego kątowi γ_j do punktu styczności tego łuku ze stożkowym zarysem czoła półcewki,
i=6 - stożkowy zarys czoła półcewki,
i=7 - łuk na pobocznicy stożka o promieniu krzywizny R_{e2j} od punktu styczności ze stożkowym zarysem czoła półcewki do punktu odpowiadającego kątowi γ_j,
i=8 - łuk przestrzenny w zakresie kąta γ_{2sj}, powstały z łuków o promieniach krzywizny R_{e2j} i R_{sgd},
i=9 - wycinek łuku o promieniu R_{sgd}.

W przyjętym układzie współrzędnych (rys. 1) punkty linii średniej zarysu czół cewki uzwojenia stojana wyznaczają współrzędne:

$$x_{1ij} = R_{ij} \cos\beta_{ij}$$

$$x_{2ij} = R_{ij} \sin\beta_{ij}$$

$$x_{3ij} = x_{3pij} + (x_{3kij} - x_{3pij})m_i, \quad \text{dla } i=1 \text{ i } 2$$

$$x_{3ij} = x_{3pij} + x_{3\varphi ij}, \quad \text{dla pozostałych i-tych segmentów,} \tag{8}$$

gdzie:

m_i - parametr zmienny w $\in \langle 0,1 \rangle$,
R_{ij} - rzut promienia wodzącego punktu linii średniej na płaszczyznę x_1-x_2 układu współrzędnych,
β_{ij} - kąt między osią x_1 i rzutem R_{ij} promienia wodzącego,
x_{3pij} - współrzędna x_{3ij} początkowego punktu i-tego segmentu,
x_{3kij} - współrzędna x_{3ij} końcowego punktu i-tego segmentu,
$x_{3\varphi ij}$ - współrzędna x_{3ij} punktu i-tego segmentu, zależna od kąta φ_{ij}.

W tabeli 1 podano zależności wyznaczające kąty β_{ij} dla poszczególnych i-tych segmentów j-tych półcewek uzwojenia stojana, w których:

ż - ilość żłobków pakietu stojana,
$y_ż$ - poskok uzwojenia stojana,
k_{1j} - współczynnik określający zależność kąta γ_{1sj} od kąta γ_j,
k_{2j} - współczynnik określający zależność kąta γ_{2sj} od kąta γ_j.

Tabela 1

Zależności wyznaczające kąty β_{ij}

Segment 1	Kąty pomocnicze φ_{ij}	Kąty pomocnicze Ψ_{ij}	β_{ij}
1	-	-	β_{wj}
2	-	-	β_{wj}
3	-	-	β_{wj}
4	$\arcsin \frac{R_{sj}}{R_{e1j}}(\sin\gamma_{1sj} - \sin(1-m_4)\gamma_{1sj})$	$\frac{R_{e1j}}{R_{psj}}(1-\cos\varphi_{4j})$	$\beta_{wj} \pm \Psi_{4j}$
5	$\varphi_{p5j} + (\varphi_{k5j} - \varphi_{p5j})m_5$ $\varphi_{p5j} = \varphi_{4j}$ dla $m_4 = 1$	$\frac{R_{e1j}}{R_{psj}}(1-\cos\varphi_{5j})$	$\beta_{wj} \pm \Psi_{5j}$
6	$\varphi_{psj} + (\varphi_{ksj} - \varphi_{psj})m_6$	$\varphi_{6j}-\mathrm{arctg}\varphi_{6j}-\Psi_{pj}$	$\beta_{wj} \pm \Psi_{6j}$
7	$\varphi_{p7j} + (\varphi_{k7j} - \varphi_{p7j})m_7$ $\varphi_{k7j} = \varphi_{8j}$ dla $m_8 = 0$	$\frac{R_{e2j}}{R_{ksj}}(1-\cos\varphi_{7j})$	$\beta_{gd} \mp \Psi_{7j}$
8	$\arcsin \frac{R_{sgd}}{R_{e2j}}(\sin\gamma_{2sj} - \sin m_8\gamma_{2sj})$	$\frac{R_{e2j}}{R_{ksj}}(1-\cos\varphi_{8j})$	$\beta_{gd} \mp \Psi_{8j}$
9	-	-	β_{gd}

W powyższych zależnościach:

1) $\beta_{wg} = 0$, $\beta_{wd} = \frac{2\pi}{z} y_{ż}$, $\beta_{gd} = \delta_g$, $\gamma_{1sj} = \gamma_j k_{1j}$, $\gamma_{2sj} = \gamma_j k_{2j}$

2) $\varphi_{k5j} = \varphi_{s5j}$, $\varphi_{p7j} = \varphi_{s7j}$ oraz φ_{ksj}, φ_{psj}, δ_g - oblicza się według wzorów podanych w pkt. 3.1.

Tabela 2

Zależności wyznaczające promienia R_{ij} oraz graniczne wartości kątów γ_{ij}

Segment i	Promień R_{ij}	Kąty graniczne	
		γ_{pij}	γ_{kij}
1	$R_{żj}$	-	-
2	$R_{żj}$	-	-
3	$R_{osj} - R_{sj} \cos\gamma_{3j}$	0	$\gamma_j(1 - k_{1j})$
4	$R_{osj} - R_{sj} \cos\gamma_{4j}$	$\gamma_j(1 - k_{1j})$	
5	$R_{psj} - R_{e1j} \sin\gamma_j \sin\varphi_{5j}$	-	-
6	$R_{ej}(\cos^2\gamma_j + \sin\gamma_j\sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_{6j}^2}$	-	-
7	$R_{ksj} - R_{e2j} \sin\gamma_j \sin\varphi_{7j}$	-	-
8	$R_{ogd} - R_{sgd} \cos\gamma_{8j}$	$\pi + \gamma_d$ dla j=d, oraz γ_g dla j=g	$\pi + \gamma_d(1-k_{2d})$ dla j=d, oraz $\gamma_g(1 + k_{2g})$ dla j=g
9	$R_{ogd} - R_{sgd} \cos\gamma_{9j}$	$\pi + \gamma_d(1-k_{2d})$ dla j=d, oraz $\gamma_g(1 + k_{2g})$ dla j=g	$0,5(\pi + \gamma_d + \gamma_g)$ dla j=d i j=g

W powyższych zależnościach $\gamma_{ij} = \gamma_{pij} + (\gamma_{kij} - \gamma_{pij})m_i$, $m_i \in \langle 0,1 \rangle$

Tabela 3

Graniczne wartości współrzędnej x_{3ij} oraz zależności wyznaczające współrzędne $x_{3\varphi ij}$ linii średniej zarysu czół uzwojenia stojana

Segment i	Wartości graniczne współrzędnej x_{3ij}		Współrzędna $x_{3\varphi ij}$
	x_{3pij}	x_{3kij}	
1	0	$w_{żj}$	-
2	$w_{żj}$	w_{oj}	-
3	w_{oj}	-	$R_{sj} \sin\gamma_{3j}$
4	w_{oj}	-	$R_{sj} \sin\gamma_{4j}$
5	x_{3psj}	-	$R_{e1j} \cos\gamma_j \sin\varphi_{5j}$
6	$x_{3psj}+x_{3\varphi 5j}$ przy $m_5 = 1$	-	$R_{ej} \cos\gamma_j (\sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_{6j}^2} - \sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_{psj}^2})$
7	x_{3ksj}	-	$-R_{e2j} \cos\gamma_j \sin\varphi_{7j}$
8	$w_{os} - R_{zgd}$	-	$R_{sgd} \sin\gamma_{8j}$
9	$w_{os} - R_{zgd}$	-	$R_{sgd} \sin\gamma_{9j}$

W powyższych zależnościach:

1) $x_{3psj} = w_{oj} + R_{sj}(\sin\gamma_j - \cos\gamma_j \sin\gamma_{1sj})$

2) $x_{3ksj} = w_{os} - R_{zgd} \pm R_{sgd}(\sin\gamma_j \pm \cos\gamma_j \sin\gamma_{2sj})$

3) $R_{zgd} = R_{gd} + h_c$

4) znaki górne dla $j = g$, znaki dolne dla $j = d$

Promienie R_{ij} punktów i-tych segmentów linii średniej zarysu czoła cewki uzwojenia stojana wyznacza się według zależności podanych w tabeli 2. W tabeli tej podano także początkowe i końcowe wartości kątów γ_{ij}. Graniczne wartości współrzędnych x_{3ij} punktów i-tych segmentów oraz zależności wyznaczające współrzędne $x_{3\varphi ij}$ podano w tabeli 3.

3.1. Styczność stożkowego zarysu linii średniej z łukami przejścia między segmentami czoła cewki

Zachowanie ciągłości na całej długości linii średniej zarysu czoła cewki uzwojenia stojana wymaga zachowania styczności stożkowych segmentów cewki (i=6) dolnej i górnej półcewki z łukami wykorbienia (segmenty i=5) oraz łukami przejścia (segmenty i=7) stożkowych zarysów czoła cewki w główkę cewki (rys. 1).

Z warunku styczności dwóch łuków przestrzennych, a mianowicie, że w punkcie wspólnym tych łuków styczne do nich pokrywają się, otrzymuje się równanie styczności dwóch łuków w postaci:

$$\cos\varphi_{sij}\frac{\varphi_{6sij}}{1+\varphi_{6sij}^2} - \sin\varphi_{sij}\frac{R_{ej}}{R_{6sij}\sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_{6sij}^2}} = 0 \tag{9}$$

w którym z geometrii stożkowego segmentu czoła cewki [3] kąt położenia promienia wodzącego punktów segmentu i=6 linii średniej wyznacza zależność:

$$\varphi_{6sij} = \frac{1}{R_{ej}\sin\gamma_j}\sqrt{(R_{sij} - R_{ej}\cos 2\gamma_j)(R_{sij} - R_{ej})} \tag{10}$$

gdzie:

$$R_{s5j} = R_{psj} + R_{e1j}\sin\gamma_j \sin\varphi_{s5j}$$

$$R_{s7j} = R_{ksj} - R_{e2j}\sin\gamma_j \sin\varphi_{s7j}$$

$$R_{ej} = \frac{\dot{z}(b_c + d_j)}{2\pi} \tag{10a}$$

przy czym:

$\dot{z}$ - ilość żłobków pakietu stojana,

b_c - szerokość przekroju poprzecznego czoła cewki,

d_j - odległość między bokami czół sąsiednich cewek.

Wyzyskując zależności (10) i (10a) w równaniu (9), wyznacza się kąt φ_{sij} dla:

- i=5 kąt φ_{s5j}, który jest kątem wodzącym promienia R_{e1j} łuku segmentu i=5 w punkcie styczności tego łuku z segmentem i=6,

- i=7 kąt φ_{s7j}, który jest kątem wodzącym promienia R_{e2j} łuku segmentu i=7 w punkcie styczności tego łuku z segmentem i=6. Kąty φ_{sij} przyjmują wartości z $\in \langle 0,\pi/2 \rangle$. W równaniu (9) promień $R_{6sij} = R_{psj}$ dla i=5 oraz $R_{6sij} = R_{ksj}$ dla i=7.

Po wyznaczeniu kątów φ_{sij} z równania (9) oblicza się według (10) z wyzyskaniem (10a) kąt $\varphi_{psj} = \varphi_{6s5j}$, który jest początkową wartością kąta promienia wodzącego określającego położenie punktów linii średniej zarysu stożkowego segmentu czoła cewki (i=6) oraz oblicza się kąt $\varphi_{ksj} = \varphi_{6s7j}$, który jest końcową wartością kąta wodzącego tego promienia. W zakresie różnicy wartości tych kątów jest kształtowany zarys stożkowy czoła cewki uzwojenia stojana.

Kąt początkowy Ψ_{pj}, przy którym linia zarysu segmentu stożkowego przecina tworzącą stożka, leżącą w płaszczyźnie określonej przez linię średnią wysięgu żłobkowego cewki i oś x_3 (rys. 1) wyznacza zależność:

$$\Psi_{pj} = \varphi_{psj} - \operatorname{arctg}\varphi_{psj} - \frac{R_{e1i}}{R_{psj}}(1 - \cos\varphi_{s5j}) \tag{11a}$$

a kąt końcowy, Ψ_{kj}, przy którym linia zarysu segmentu stożkowego przecina tworzącą stożka, leżącą w płaszczyźnie przechodzącej przez linię średnią główki cewki i oś x_3, wyznacza zależność:

$$\Psi_{kj} = \varphi_{ksj} - \operatorname{arctg}\varphi_{ksj} + \frac{R_{e2i}}{R_{ksj}}(1 - \cos\varphi_{s7j}) \ . \tag{11b}$$

Kąt rozpiętości dolnej półcewki (rys. 2):

$$\delta_d = \Psi_{kd} - \Psi_{pd} \tag{12a}$$

a kąt rozpiętości górnej półcewki:

$$\delta_g = \Psi_{kg} - \Psi_{pg} \tag{12b}$$

Ciągłość linii średniej zarysu czoła cewki między dolną i górną półcewką będzie zachowana, gdy:

$$\delta_d + \delta_g = \frac{2\pi}{z} y_z \ , \tag{13}$$

Sposób spełnienia tego warunku zależy od przyjętych założeń konstrukcyjnych cewki uzwojenia stojana, w których może wystąpić:

1) wariant A - gdy cewka jest symetryczna, wówczas $\delta_d = \delta_g = \frac{\pi}{z} y_z$,

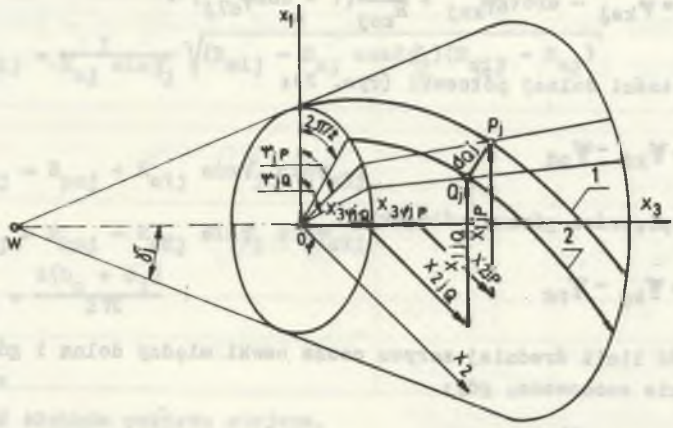
2) wariant B - gdy cewka jest niesymetryczna i długość linii średniej dolnej półcewki s_d musi być równa długości linii średniej górnej półcewki s_g,

3) wariant C - gdy cewka jest niesymetryczna i długości linii średnich półcewek są różne.

Każdy z tych wariantów może być spełniony przez uznanie za parametr zmienny jednej z trzech wielkości wejściowych do obliczeń, a mianowicie d_j, w_{os} i w_p.

3.2. Odległość między liniami średnimi stożkowych segmentów czół uzwojeń stojana

Założona we wzorze (10a) odległość $b_c + d_j$ dwóch sąsiednich ewolwent obróconych o kąt $\varphi_o = 2\pi/z$ jest rzeczywistą odległością między nimi tylko na płaszczyźnie. Z uwagi na krzywiznę pobocznicy stożka odległość między liniami kładu tych ewolwent na pobocznicę stożka ulegnie zmniejszeniu. Ewolwentowy charakter linii kładu ewolwenty na pobocznicę stożka sprawia, że za odległość między liniami 1 i 2 (rys. 3) można w pełni uznać odległość punktu P_j na linii 1 od punktu Q_j przecięcia linii 2 płaszczyzną przechodzącą przez punkt P_j i prostopadłą do linii 1 w tym punkcie.



Rys. 3. Odległość między dwoma segmentami stożkowymi czoła cewki uzwojenia stojana

Fig. 3. Distance between two conic parts of the end coil of stator winding

Współrzędne punktu P_j linii 1 wyznaczają równania (8), a współrzędne punktu Q_j na linii 2 wyznaczają jej równania parametryczne:

$$x_{1Qj} = R\varphi_{Qj} \cos\beta_{Qj}$$

$$x_{2Qj} = R\varphi_{Qj} \sin\beta_{Qj}$$

$$x_{3Qj} = x_{3p6j} + x_{3\varphi Qj} \tag{14}$$

gdzie:

$$R\varphi_{Qj} = R_{ej}(\cos\gamma_j + \sin\gamma_j \sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_Q^2})$$

$$x_{3\varphi Qj} = R_{ej} \cos\gamma_j (\sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_Q^2} - \sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_{psj}^2})$$

$$\beta_{Qj} = \beta_{wj} \pm (\frac{2\pi}{z} + \Psi_Q - \Psi_{p6j}), \quad + \text{ dla } j=g, \; - \text{ dla } j=d, \tag{14a}$$

oraz

$$\Psi_Q = \varphi_Q - \operatorname{arctg}\varphi_Q$$

$$\Psi_{psj} = \varphi_{psj} - \operatorname{arctg}\varphi_{psj} \; . \tag{14b}$$

Współrzędne punktu Q_j przecięcia linii 2 płaszczyzną prostopadłą do linii 1 w punkcie P_j oblicza się po wyznaczeniu kąta φ_{Qj} z równania:

$$(x_{1Qj} - x_{16j}) \frac{dx_{16j}}{dm_6} + (x_{2Qj} - x_{26j}) \frac{dx_{26j}}{dm_6} + (x_{3Qj} - x_{36j}) \frac{dx_{36j}}{dm_6} = 0 \tag{15}$$

w którym pochodne linii 1 w punkcie P_j wyznacza się według wzoru (19). Kąt φ_{Qj} przyjmuje wartości $w \in \langle(\varphi_{6j} - 2\pi/z), \varphi_{6j}\rangle$.

Po wyznaczeniu kąta φ_{Qj} oblicza się współrzędne punktu Q_j, a następnie odległość punktu P_j od punktu Q_j z zależności:

$$d_{PQj} = \sqrt{(x_{1Qj} - x_{16j})^2 + (x_{2Qj} - x_{26j})^2 + (x_{3Qj} - x_{36j})^2} \; . \tag{16}$$

3.3. Długość linii średniej cewki uzwojenia stojana

Długość linii średniej cewki uzwojenia stojana wyznacza zależność:

$$L_{śr} = 2(s_d + s_g + l_ż) \tag{17}$$

Tabela 4

Zależności wyznaczające wielkości A_{ij} oraz B_{ij}

Segment i	A_{ij}	B_{ij}
1	$x_{3k1j} - x_{3p1j}$	0
2	$x_{3k2j} - x_{3p2j}$	0
3	$R_{sj}(\gamma_{k3j} - \gamma_{p3j})$	0
4	$R_{sj}(\gamma_{k4j} - \gamma_{p4j})$	$\pm \frac{R_{sj}^2}{R_{psj}} \cdot \frac{\gamma_{1sj} \cos(1 - m_4)\gamma_{1sj}(\sin\gamma_{1sj} - \sin(1 - m_4)\gamma_{1sj})}{\sqrt{R_{e1j}^2 - R_{sj}^2(\sin\gamma_{1sj} - \sin(1 - m_4)\gamma_{1sj})^2}} \cdot R_{4j}$
5	$R_{e1j}(\varphi_{k5j} - \varphi_{p5j})\cos\varphi_{5j}$	$\pm \frac{R_{e1j}}{R_{psj}} R_{5j}(\varphi_{k5j} - \varphi_{p5j})\sin\varphi_{5j}$
6	$R_{ej} \frac{(\varphi_{ksj} - \varphi_{psj})\varphi_{6j}}{\sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_{6j}^2}}$	$\pm R_{6j} \frac{(\varphi_{ksj} - \varphi_{psj})\varphi_{6j}^2}{1 + \varphi_{6j}^2}$
7	$- R_{e2j}(\varphi_{k7j} - \varphi_{p7j})\cos\varphi_{7j}$	$\mp \frac{R_{e2j}}{R_{ksj}} R_{7j}(\varphi_{k7j} - \varphi_{p7j})\sin\varphi_{7j}$
8	$R_{sgd}(\gamma_{k8j} - \gamma_{p8j})$	$\mp R_{8j} \frac{R_{sgd}^2}{R_{ksj}} \frac{\gamma_{2sj} \cos m_8\gamma_{2sj}(\sin\gamma_{2sj} - \sin m_8\gamma_{2sj})}{\sqrt{R_{e2j}^2 - R_{sgd}^2(\sin\gamma_{2sj} - \sin m_8\gamma_{2sj})^2}}$
9	$R_{sgd}(\gamma_{k9j} - \gamma_{p9j})$	0

Uwaga: znaki górne dla j=g, znaki dolne dla j=d

gdzie:

s_d - długość linii średniej czoła dolnej półcewki, łącznie z wysięgiem żłobkowym,

s_g - długość linii średniej czoła górnej półcewki, łącznie z wysięgiem żłobkowym,

$l_ż$ - długość pakietu stojana.

Długość poszczególnych i-tych segmentów czoła półcewki wyznacza zależność:

$$s_{ij} = \int_0^1 \sqrt{\left(\frac{dx_{1ij}}{dm_i}\right)^2 + \left(\frac{dx_{2ij}}{dm_i}\right)^2 + \left(\frac{dx_{3ij}}{dm_i}\right)^2}\, dm_i \tag{18}$$

gdzie:

$$\frac{dx_{1ij}}{dm_i} = A_i \sin\delta_{ij} \cos\beta_{ij} - B_i \sin\beta_{ij}$$

$$\frac{dx_{2ij}}{dm_i} = A_i \sin\delta_{ij} \sin\beta_{ij} + B_i \cos\beta_{ij}$$

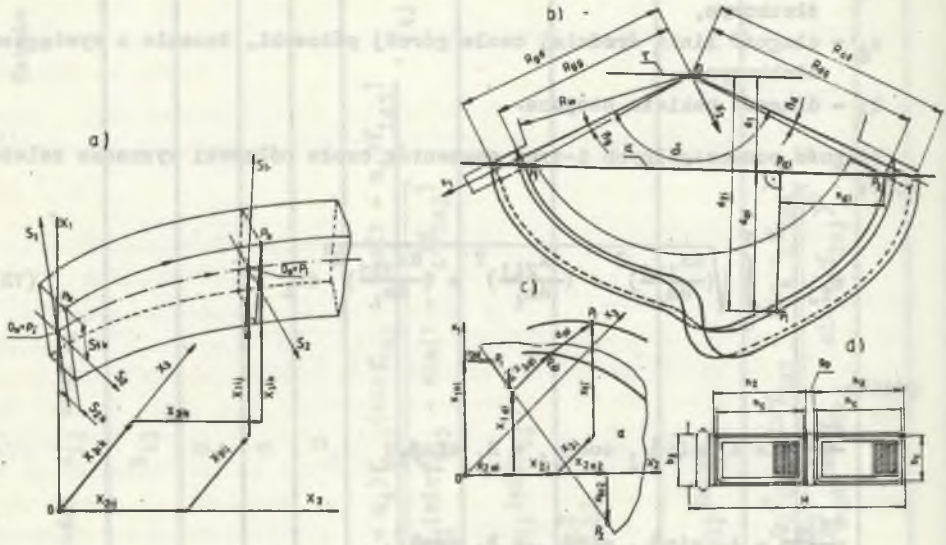
$$\frac{dx_{3ij}}{dm_i} = A_i \cos\delta_{ij} \tag{19}$$

przy czym - $\delta_{ij} = \gamma_{ij}$ dla 3,4,8,9 - $\delta_{ij} = \gamma_j$ dla i=5,6,7 oraz $\delta_{ij} = 0$ dla i = 1,2. Zależności na A_i oraz B_i występujące we wzorze (19) podano w tabeli 4. Całkowita długość linii średniej czoła półcewki jest sumą długości jej segmentów składowych, czyli:

$$s_j = \sum_{i=1}^{i=9} s_{ij} \tag{20}$$

4. Rzuty przekrojów poprzecznych czoła cewki uzwojenia stojana

Celem wyznaczenia współrzędnych punktów charakterystycznych konturu przekroju poprzecznego czoła cewki przyjmuje się lokalny układ współrzędnych s_1, s_2 (rys. 4a), którego osie pokrywają się z głównymi osiami przekroju poprzecznego czoła cewki. Układ ten, zgodny ze skrętnością stożkowego segmentu półcewki, przesuwa się wzdłuż zarysu linii średniej czoła półcewki w płaszczyźnie prostopadłej do stycznej do linii średniej. Oś s_1 jest prostopadła do powierzchni walcowych o promieniach R_{ij} dla segmentów



Rys. 4. Rzuty przekrojów poprzecznych czoła cewki uzwojenia stojana a) położenie układu osi s_1, s_2 w układzie współrzędnych x_1, x_2, x_3, b) rzuty czoła cewki na płaszczyznę x_1-x_2, c) rzut punktu P_i na płaszczyznę, d) wymiary przekroju poprzecznego czoła cewki

Fig. 4. Projections of the cross - sections of the stator end coil a) position of axes system s_1, s_2 in coordinate system x_1, x_2, x_3, b) projection of the end coil on plane x_1-x_2, c) projection of point P_i on plane, d) dimensions of the cross - section of the end coil

i=1,2,3,4,8,9 oraz prostopadła do powierzchni stożkowej, na której leżą segmenty czoła cewki i=5,6,7.

Wykorzystując zależności obowiązujące przy przesuwaniu i obrocie układu współrzędnych s_1, s_2 względem układu x_1, x_2, x_3 - współrzędne punktu $P_k(s_1, s_2)$ przyjmują wartości w układzie współrzędnych x_1, x_2, x_3:

$$x_{1ik} = a_{11}\, s_{1k} + a_{21}\, s_{2k} + x_{1ij}$$

$$x_{2ik} = a_{12}\, s_{1k} + a_{22}\, s_{2k} + x_{2ij}$$

$$x_{3ik} = a_{13}\, s_{1k} + a_{23}\, s_{2k} + x_{3ij} \qquad (21)$$

w których $a_{11},\ldots,a_{23}$ są wartościami cosinusów kierunkowych osi układów współrzędnych, obliczane według wzorów:

$$a_{11} = \cos\delta_{ij}\cos\beta_{ij}$$

$$a_{12} = \cos\delta_{ij}\sin\beta_{ij}$$

$$a_{13} = -\sin\delta_{ij} \tag{21a}$$

oraz:

$$a_{21} = \pm C_{ij}(-A_{ij}\sin\beta_{ij} - B_{ij}\cos\beta_{ij}\sin\delta_{in})$$

$$a_{22} = \pm C_{ij}(A_{ij}\cos\beta_{ij} - B_{ij}\sin\beta_{ij}\sin\delta_{ij})$$

$$a_{23} = \pm C_{ij}B_{ij}\cos\delta_{ij} \tag{21b}$$

gdzie:

$$C_{ij} = \frac{1}{\sqrt{A_{ij}^2 + B_{ij}^2}} \tag{21c}$$

przy czym znaki górne obowiązują dla $j=g$, a znaki dolne dla $j=d$. We wzorach (21a) i (21b) kąt $\delta_{ij} = 0$ dla $i=1,2$; $\delta_{ij} = \gamma_{ij}$ dla $i=3,4,8,9$; oraz $\delta_{ij} = \gamma_j$ dla $i=5,6,7$.

Współrzędne punktów $P_k(s_{1k},s_{2k})$ konturu przekroju poprzecznego czoła cewki, których położenie wyznacza się w układzie współrzędnych x_1,x_2,x_3, podaje tabela 5.

Odległość punktów P_k od osi x_3 wyznacza promień:

$$R_{ik} = \sqrt{x_{1ik}^2 + x_{2ik}^2}\,. \tag{22}$$

Tabela 5

Współrzędne s_{1k} i s_{2k} punktów P_k

k =	1	2	3	4	5	Uwagi
s_{1k}	$\frac{1}{2}h_i$	$-\frac{1}{2}h_i$	$-\frac{1}{2}h_i$	$\frac{1}{2}h_i$	0	$h_i = h_ż$, $b_i = b_ż$ dla $i=1$, oraz $h_i = h_c$, $b_i = b_c$ dla pozostałych i
s_{2k}	$\frac{1}{2}b_i$	$\frac{1}{2}b_i$	$-\frac{1}{2}b_i$	$\frac{1}{2}b_i$	0	

5. Kształtowanie czół uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużych mocy

Czoła cewek uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużych mocy najczęściej kształtuje się na specjalnie do tego celu wykonanych szablonach (modelach). Wprowadzane ostatnio w kraju specjalne rozciągarki do kształtowania czół cewek uzwojenia stojana wymagają także wykonania i nastawienia segmentów szablonów kształtujących czoło cewki. Dla czół uzwojeń stojanów maszyn dwubiegunowych z uwagi na ich długość stosuje się często wstępne kształtowanie na rozciągarkach, a dokładne na szablonach.

Wyniki analitycznego wyznaczania zarysu czoła cewki uzwojenia stojana można wyzyskać bezpośrednio przy wykonywaniu na obrabiarkach kopiujących szablonu do kształtowania czół cewki stojana lub przy ustawianiu segmentów szablonu na rozciągarkach kształtujących.

Często zachodzi konieczność wykonania szablonu (wspólnego dla dolnej i górnej półcewki) do kształtowania czół cewek z bryły prostopadłościanu. W tym celu wykonuje się rzuty prostopadłe punktów charakterystycznych przekroju poprzecznego czoła cewki na płaszczyznę α, przechodzącą przez punkty P_1 i P_2 (rys. 4b) równolegle do osi x_3. Płaszczyzna α odpowiada górnej płaszczyźnie prostopadłościanu, w którym ma być wykonany szablon do kształtowania czoła cewki uzwojenia stojana.

Przez punkt $P_i(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i})$ przekroju czoła cewki prowadzi się prostą prostopadłą do płaszczyzny α. Punkt przebicia płaszczyzny α przez tę prostą jest rzutem P_{ai} punktu P_i na płaszczyznę α. W układzie współrzędnych x_1, x_2, x_3 współrzędne punktu P_{ai} wynoszą:

$$x_{1ai} = \frac{x_{1i}(x_{102}-x_{101})^2 + x_{101}(x_{202}-x_{201})^2 - (x_{201}-x_{2i})(x_{102}-x_{101})(x_{202}-x_{201})}{(x_{102}-x_{101})^2 + (x_{202}-x_{201})^2}$$

$$x_{2ai} = \frac{(x_{1ai}-x_{101})(x_{202}-x_{201}) + x_{201}(x_{102}-x_{101})}{x_{102}-x_{101}}$$

$$x_{3ai} = x_{3i} \tag{23}$$

gdzie współrzędne punktów P_1 i P_2 (rys. 4c) odpowiednio wynoszą:

$$x_{101} = R_{gg}$$

$$x_{201} = 0{,}5\ b_c$$

$$x_{102} = \sqrt{R_{dg}^2 + (0{,}5\ b_c)^2}\ \cos(\delta - \beta_d)$$

$$x_{202} = \sqrt{R_{dg}^2 + (0{,}5\ b_c)^2}\ \sin(\delta - \beta_d) \tag{23a}$$

w których:

$$R_{cc} = R_w + H - \frac{3h_z + h_c}{2} - \varepsilon_p$$

$$R_{dc} = R_w + H - \frac{h_z + h_c}{2}$$

$$\delta = \frac{2\pi}{z} y_z$$

$$\beta_d = \operatorname{arctg} \frac{b_c}{2R_{dc}} . \tag{23b}$$

Wielkości występujące we wzorach (23) zaznaczono na rys. 4b, c, d.

Odległość punktu P_1 od punktu P_{ai} wynosi:

$$s_{ai} = \pm\sqrt{(x_{1ai} - x_{101})^2 + (x_{2ai} - x_{201})^2} . \tag{24}$$

Odległość s_{ai} przyjmuje się za dodatnią i obowiązuje znak +, gdy $x_{201} < x_{2ai}$ i za ujemną (znak -), gdy $x_{201} > x_{2ai}$.

Odległość punktu P_i od płaszczyzny wyznacza się drogą pośrednią. W tym celu prowadzi się płaszczyznę τ (rys. 4b) równoległą do płaszczyzny i przechodzącą przez początek układu współrzędnych x_1, x_2, x_3. Odległość między płaszczyznami α i τ wynosi:

$$d_1 = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \tag{25}$$

gdzie:

$$A = x_{202} - x_{201}$$

$$B = -(x_{102} - x_{101})$$

$$C = x_{201}(x_{102} - x_{101}) - x_{101}(x_{202} - x_{201}) \tag{25a}$$

a odległość punktu P_i od płaszczyzny τ wynosi:

$$d_2 = \frac{|A\, x_{1i} + B\, x_{2i}|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \tag{26}$$

wobec tego odległość punktu P_i od płaszczyzny α wynosi:

$$d_{ai} = d_2 - d_1 \, . \tag{27}$$

Zależności (23) do (26), umożliwiają wyznaczenie wymiarów szablonu do formowania czół cewek uzwojenia stojana.

LITERATURA

[1] Aleksiejew A.E.: Konstrukcja maszyn elektrycznych. PWT, Warszawa 1953.
[2] Dąbrowski M.: Konstrukcja maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1977.
[3] Drak B.: Kształtowanie czół uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy. Energetyka nr 3-1986.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Zbigniew Stein

Wpłynęło do redakcji dnia 15 czerwca 1987 r.

ГЕОМЕТРИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТОК СТАТОРОВ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Р е з ю м е

Представлен аналитический метод определения геометрий лобовых частей катушек двухслойных обмоток статоров индукционных машин большой мощности, а также метод определения геометрии шаблонов формирования катушек. Принятая линия контура конусного сегмента лобовой части катушки, это пространственная проекция эвольвенты круга на конус, на котором лежат центры поперечных сечений катушки. Эвольвента круга локализована на плоскости пересекающей конус в кругу, которая покрывается с базовым кругом эвольвенты. Так принятая линия контура обезпечивает разное расстояние между боками лобовых частей катушек обмоток статора на всей длине конусных сегментов. Алгоритм определения контура катушек обмотки статора, а также шаблонов для формирования катушек, проверены при проектировании и изготовлении катушек обмотки статора индукционного двигателя с мощностью 1600 кВ.

GEOMETRY AND FORMING OF STATOR END WINDINGS OF LARGE - POWER INDUCTION MACHINES

S u m m a r y

The analytical method of determination of the profile of two - layer stator end windings of large - power induction machines as well as the method of calculating dimensions of coil formers are presented. The assumed profile of a conic part of the end winding is a spatial section of the circle involute on a side surface of the cone, on which centres on the end windings cross sections are situated. The circle involute has been placed on the plane intersecting the side surface of the cone in the circle which coincides with the basic circle of the involute. So - assumed contour line provides equal distance between the sides of the stator end windings along the whole conic part. The algorithm of calculation of the profile of the stator soils and coil formers have been tested during design work and when producing the stator coils of the 1600 kW induction motor.