ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994

Seria: ELEKTRYKA z. 138 Nr kol. 1245

Bronisław DRAK

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE KSZTAŁTOWANIA CZÓŁ UZWOJEŃ STOJANÓW SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY

Streszczenie. Opisano metodę wyznaczania zarysu czół cewek dwuwarstwowych uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Przedstawiono sposób projektowania zarysu czół cewek przy zastosowaniu opracowanego programu komputerowego KUS. Podano przykładowe zastosowanie komputerowego wspomagania projektowania zarysu czół cewek oraz szablonów kształtujących.

COMPUTER-AIDED FORMATION OF END WINDINGS OF STATORS OF HIGH-POWER INDUCTION MOTORS

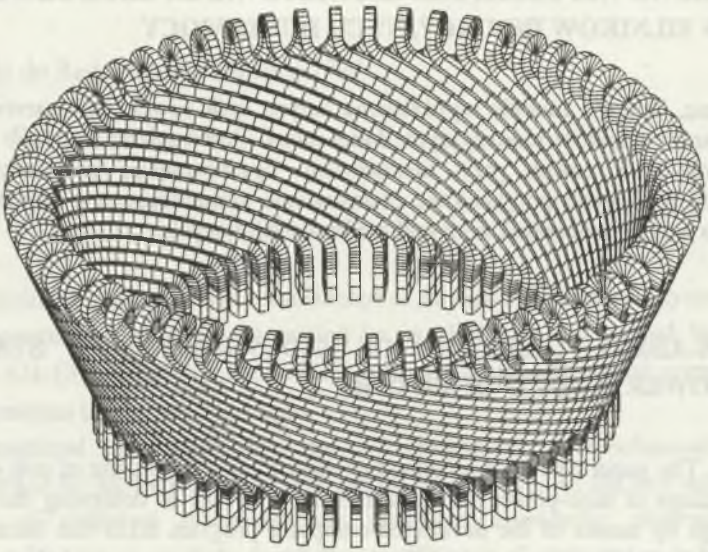
Summary. The paper describes a method of determining the profile of coil endings of stator windings of high-power induction motors. The way of designing the profile of coil endings by means of the developed computer program KUS has been given. The paper also provides examples of the application of computer-aided designing profiles of coil endings and contour masters.

COMPUTER-GESTÜTZTE FORMGEBUNG DER STIRNVERBINDUNGEN VON STÄNDERN HOCHLEISTUNGSFÄHIGER INDUKTIONSMOTOREN

Zusammenfassung. Erörtert wird eine Methode der Bestimmung des Profils der Stirnverbindungen zweischichtiger Wicklungen von Ständern hochleistungsfähiger Induktionsmotoren. Es wird eine Möglichkeit erörtert, das Profil der Stirnverbindungen mittels des entwickelten KUS-Computerprogramms zu projektieren. Beispiele der Anwendung computer-gestützten Projektierung des Stirnverbindungsprofils von Spulen wie auch der Formgebungsschablonen werden angeführt.

1. WSTĘP

Zarysy czół dwuwarstwowych uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy (rys.1) tworzą dwie powierzchnie stożkowe. Jedną z nich tworzą czoła górnej, a drugą czoła dolnej warstwy uzwojenia stojana, której cewki leżą na dnie żłobków pakietu stojana.



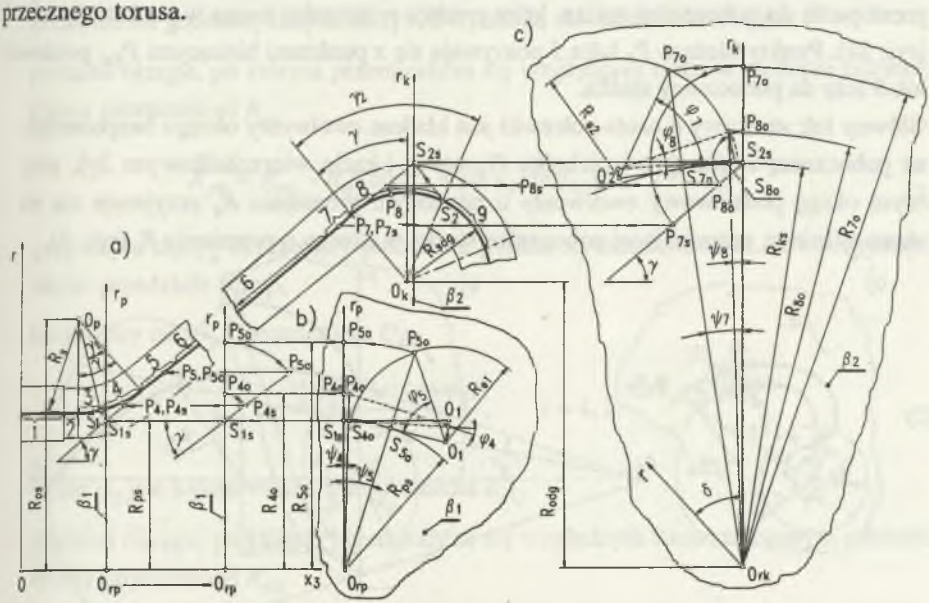
Rys. 1. Widok czół uzwojenia stojana silnika indukcyjnego dużej mocy
Fig. 1. View of the end windings of the stator of a high-power motor

Linia, według której kształtuje się czoła uzwojeń, powinna zapewniać stałą odległość między bokami głównych łuków stożkowych czół cewek. W praktyce często zdarza się, że przylegają one do siebie w pobliżu wykorbienia, po wyjściu cewki ze żłobka stojana, mimo dużej odległości między nimi przy główkach cewek. Dokładne ukształtowanie czół cewek - ważne szczególnie dla uzwojeń stojanów silników dwubiegunowych ze względu na ich długość i duży poskok uzwojenia - jest możliwe jedynie przy analitycznym zapisie zarysu czół oraz zarysów szablonów, na których kształtuje się czoła cewek.

Podana w tym artykule metoda wyznaczania kształtu czół cewek uzwojenia stojana została sprawdzona w warunkach przemysłowych. Spełnia ona warunek dotyczący równej odległości między bokami głównych łuków stożkowyh czół cewek i jest dostosowana do wspomagania komputerowego przy projektowaniu kształtu cewek oraz szablonów kształtujących ich czoła .

2. ZARYS CZOŁA CEWKI UZWOJENIA STOJANA

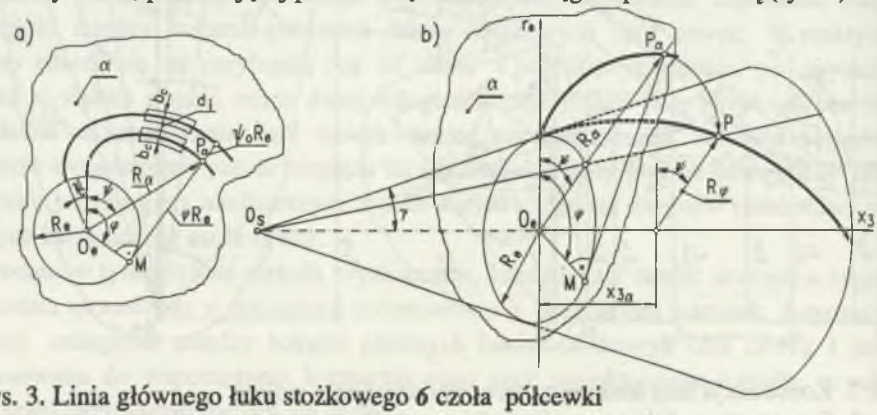
Linia średnia czoła półcewki uzwojenia stojana - przechodząca przez środki przekrojów poprzecznych cewki - jest linią ciągłą i w układzie współrzędnych walcowych r, ψ, x_3 jest przedstawiona na rys. 2. Tworzy ją dziewięć i-tych elementów składowych, a mianowicie: prostoliniowy odcinek wysięgu żłobkowego o izolacji żłobkowej ($i = 1$) i izolacji czołowej ($i = 2$), łuki ($i = 3$, 4, 5), które są składowymi wykorbienia czoła półcewki, główny łuk stożkowy półcewki ($i = 6$), łuki ($i = 7$, 8), stanowiące linię przejścia półcewki w główkę cewki ($i = 9$). Elementy *1*, *2*, *3* linii średniej półcewki leżą w płaszczyźnie symetrii żłobka stojana ($\psi = 0$), elementy *4*, *5*, *6*, *7*, *8* tej linii tworzą łuki przestrzenne (kąt ψ = var jest mierzony między płaszczyzną wyznaczoną przez osie współrzędnych r i x_3 a płaszczyzną wyznaczoną przez bieżący punkt linii średniej oraz oś x_3), natomiast element *9* linii średniej leży na płaszczyźnie nachylonej pod kątem $\psi = \delta$ względem osi r (rys. 2c). Łuki *3* i *4* leżą na pobocznicy torusa o promieniu R_{os} jego okręgu podziałowego, na którym leżą środki O_p kołowych przekrojów poprzecznych torusa o promieniu R_s. Łuki *5*, *6*, i *7* leżą na pobocznicy stożka o kącie wierzchołkowym 2γ. Natomiast łuki **8** i **9** leżą na pobocznicy torusa o promieniu R_{odg} jego okręgu podziałowego i promieniu R_{sdg} kołowego przekroju poprzecznego torusa.



Rys. 2. Konstrukcja linii średniej czoła cewki uzwojenia stojana
Fig. 2. Construction of the centre line of the end winding of the stator

Konstrukcję łuków *4* i *5* rozpoczyna się od poprowadzenia prostej prostopadłej do pobocznicy stożka z punktu S_1 styczności łuków *3* i *4*. Prosta ta przebija pobocznicę stożka w punkcie S_{1s} (rys. 2a i b). Przez ten punkt prowadzi się płaszczyznę β_1, przecinającą pobocznicę stożka w okręgu o promieniu R_{ps} (rys. 2b). W płaszczyźnie β_1 przemieszcza się względnym ruchem tocznym, stycznie do okręgu o promieniu R_{ps} odcinek $S_{1s}O_1$, wyznaczający promień R_{e1} krzywizny pomocniczego łuku o bieżącym środku O_1 (rys. 2b). Bieżącemu punktowi S_{io} (i = 4, 5) styczności odcinka $S_{1s}O_1$ z okręgiem odpowiada bieżące położenie środka O_1, a odcinek $S_{io}O_1$ jest równy różnicy promienia R_{e1} i długości łuku $S_{1s}S_{io}$. Z bieżącego punktu O_1 kreśli się łuk o promieniu krzywizny R_{e1}, który przecina prostą przechodzacą przez środek O_{rp} okręgu o promieniu R_{ps} i punkt S_{io} w punkcie P_{io} (i = 4, 5). Punktowi P_{io} odpowiada kąt środkowy φ_i segmentu okręgu o promieniu R_{ps}, mierzonego od punktu S_{1s} do S_{io} i współzależny kąt środkowy φ_i łuku o promieniu R_{e1} między otaczanym odcinkiem $S_{1s}O_1$ i promieniem O_1P_{io}. Punkty P_{io} tak otrzymanej krzywej na płaszczyźnie β_1 kładzie się na pobocznicę stożka poprzez obrót bieżącego punktu P_{io} wokół punktu S_{io} w płaszczyźnie wyznaczonej przez oś x_3 i prostą przechodzacą przez punkty O_{rp} S_{io}. Promieniem obrotu jest odcinek $S_{io}P_{io}$. Punktom P_{io} na płaszczyznie β_1 odpowiadają punkty P_{is} na pobocznicy stożka (rys. 2b). Przez punkt bieżący P_{4s} prowadzi się prostą prostopadłą do pobocznicy stożka, która przebija pobocznicę torusa w punkcie P_4 łuku *4* (rys. 2a). Punkty bieżące P_5 łuku *5* pokrywają się z punktami bieżącymi P_{5s}, ponieważ łuk *5* leży na pobocznicy stożka.

Główny łuk stożkowy *6* czoła półcewki jest kładem ewolwenty okręgu bezpośrednio na pobocznicę stożka (o wierzchołku O_s, osi x_3 i kącie wierzchołkowym 2γ), przy czym okrąg podstawowy ewolwenty o założonym promieniu R_e przyjmuje się na płaszczyźnie α, przecinającej pobocznicę stożka w okręgu o promieniu R_e (rys. 3).



Rys. 3. Linia głównego łuku stożkowego *6* czoła półcewki
Fig. 3. Arc line of the main cone arc *6* of the semi-coil ending

Na płaszczyźnie α punkt P_α ewolwenty jest określony przez promień R_α i kąt ψ (mierzony od osi r_e), który jest zależny od kąta wodzącego φ promienia O_eM okręgu podstawowego ewolwenty. Przez obrót punktu P_α wokół punktu O_e w płaszczyźnie przechodzącej przez promień R_α i oś x_3 - w przebiciu pobocznicy stożka przez okrąg obrotu punktu P_α - otrzymuje się punkt P, który jest jednym z punktów krzywej, na której leży linia średnia głównego łuku stożkowego *6* czoła półcewki.

Główny łuk stożkowy *6* przechodzi przez łuki *7* i *8* w główkę cewki *9*, która jest łukiem płaskim o promieniu R_{sdg}, leżącym w płaszczyźnie symetrii główki cewki. Płaszczyzna ta przechodzi przez oś x_3 i jest skręcona o kąt δ względem osi r (rys. 2c).

Przedstawiona na rys. 2c konstrukcja łuku *7* i *8* jest analogiczna do konstrukcji łuku *5* i *4* (rys. 2b), przy czym odcinek $S_{2s}O_2$, równy promieniowi R_{e2} łuku pomocniczego przemieszcza się względnym ruchem tocznym po okręgu o promieniu R_{ks} w płaszczyźnie β_2, która przechodzi przez punkt S_{2s} będący rzutem prostopadłym punktu S_2 styczności łuku *8* i *9* na pobocznicę stożka.

W związkach analitycznych, opisujących kształt czoła cewki uzwojenia stojana, wprowadza się indeks $i = 1,...,9$ dla i -tych elementów składowych półcewki, a także indeks $j = d$ dla dolnej oraz $j = g$ dla górnej półcewki.

Z zależności geometrycznych na rys. 2 wynikają zależności określające:

- promień okręgu, po którym przemieszcza się względnym ruchem tocznym odcinek równy promieniowi R_{e1j}

$$R_{psj} = R_{osj} - R_{sj}(\cos\gamma_j + \sin\gamma_j \sin\gamma_{1j}), \qquad j = d, g \tag{1}$$

przy czym kąt γ_{1j} określający poło żenie punktu styczności łuków *3* i *4* przyjmuje się w przedziale $\langle 0, \gamma_j \rangle$,

- kąt między osią r_p i promieniem O_{rp}

$$\psi_{ij} = \frac{R_{e1j}(1 - \cos\varphi_{ij})}{R_{psj}}, \qquad i = 4, 5, \tag{2}$$

gdzie φ_{ij} jest kątem wodzącym promienia R_{e1j},

- promień okręgu, po którym przemieszcza się względnym ruchem tocznym odcinek równy promieniowi R_{e2j}

$$R_{ksj} = R_{odg} \pm R_{sdg}(\cos\gamma_j \pm \sin\gamma_j \sin\gamma_{2j}), \tag{3}$$

przy czym znaki górne obowiązują dla $j = g$, zaś znaki dolne dla $j = d$, a kąt γ_j (określający poło żenie punktu styczności łuków *8* i *9*) przyjmuje się w przedziale $\left\langle 0, \left(\pi + \gamma_d - \gamma_g\right)/2 \right\rangle$,

– kąt między osią r_k i promieniem $O_{rk}S_{io}$

$$\psi_{ij} = \frac{R_{e2j}(1-\cos\varphi_{ij})}{R_{ksj}}, \qquad i = 7, 8, \tag{4}$$

gdzie φ_{ij} jest kątem wodzącym promienia R_{e2j}.

Wykorzystując właściwości linii głównego łuku stożkowego *6* [1] oraz oznaczenia z rys. 3, otrzymuje się zależności wyznaczające:

– kąt wodzący ψ_j punktu P (rys.2.3b), równy kątowi między osią r_e i promieniem wodzącym R_α punktu P_α ewolwenty

$$\psi_j = \varphi_j - \arctan\varphi_j, \tag{5}$$

gdzie φ_{ij} jest kątem wodzącym promienia O_eM ewolwenty (rys. 3b),

– promień wodzący punktu P - równy odległości tego punktu od osi x_3,

$$R_{\varphi j} = R_{ej}(\cos^2\gamma_j + \sin\gamma_j\sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_j^{\,2}}), \tag{6}$$

gdzie promień okręgu podstawowego ewolwenty

$$R_{ej} = \frac{Q_s\left(b_c + d_j\right)}{2\pi}, \tag{6a}$$

przy czym:

Q_s - liczba żłobków pakietu stojana,

d_j - odległość między bokami głównych segmentów stożkowych *6* czół j-tej warstwy uzwojenia stojana, mierzona na płaszczyźnie α (rys. 3a),

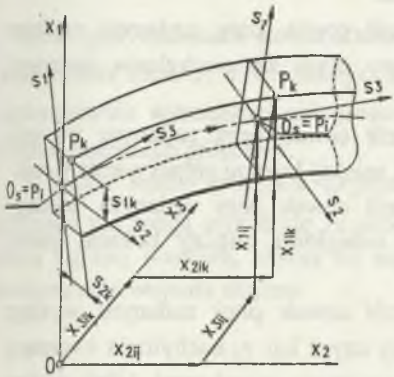
b_c - szerokość czoła cewki uzwojenia stojana.

– odległość punktu P od płaszczyzny α

$$x_{3\alpha} = R_{ej}\cos\gamma_j\left(\sqrt{\sin^2\gamma_j + \varphi_j^2} - \sin\gamma_j\right) \tag{7}$$

Zależności (1),.., (7) umożliwiają zapis analityczny kształtu czół cewek uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy, których czoła cewek są rozło żone na powierzchniach stożkowych.

W zapisie analitycznym linii zarysu zewnętrznego czoła cewki uzwojenia stojana przyjmuje się lokalny układ współrzędnych prostokątnych s_w (w = 1, 2, 3) o początku w punkcie P_i (rys. 4) linii średniej, którego osie s_1 i s_2 pokrywają się z głównymi osiami przekroju poprzecznego czoła cewki. Układ ten, który jest zgodny ze skrętnością głównego łuku stożkowego **6** j-tej półcewki, przesuwa się wzdłuż linii średniej czoła półcewki w ten sposób, że:



Rys. 4. Układ współrzędnych s_w
Fig. 4. Coordination system s_w

- oś s_3 pokrywa się ze styczną do linii średniej w punkcie P_i,
- oś s_2 w punkcie P_i jest styczna do powierzchni: walcowych o promie- niach R_{ij} - dla elementów i = 1, 2 czoła półcewki, torusa - odpowiednio dla elementów i = 3, 4, 8, 9 oraz powierzchni stożkowej, na której leżą elementy i = 5, 6, 7 czoła półcewki,
- oś s_1 w punkcie P_i jest prostopadła do tych powierzchni, do których oś s_2 jest styczna do linii średniej w tym punkcie.

Wykorzystując zależności obowiązujące przy przesuwaniu i obrocie układu współrzędnych s_w względem stacjonarnego układu współrzednych x_w, współrzędne punktu $P_{ik}(s_{wk})$ przekroju poprzecznego czoła cewki w układzie s_w wyznacza się współrzędne zarysu zewnętrznego czoła cewki w układzie współrzędnych x_w:

3. PROGRAM OBLICZEŃ KOMPUTEROWYCH KSZTAŁTU CZÓŁ CEWEK

Podany sposób konstrucji linii średniej czoła cewki, podstawowe zależności (1),..,(7) oraz algorytm obliczeń opisany w [2] były podstawą opracowania programu KUS obliczeń komputerowych kształtu cewek uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy [5], których czoła tworzą dwie powierzchnie stożkowe - dolnej i górnej warstwy uzwojenia. Program ten umożliwia projektowanie kształtu czół cewek uzwojenia stojana w trzech różnych wariantach rozwiązań konstrukcyjnych cewek.

Wariant A - umożliwia projektowanie kształtu czół cewek symetrycznych o równych rozpiętościach kątowych ($\delta_d = \delta_g$),

Wariant B - umożliwia projektowanie kształtu czół cewek o równych długościach ich półcewek ($s_d = s_g$),

Wariant C - umożliwia projektowanie kształtu czół cewek o równych odległościach między bokami czół głównych łuków stożkowych półcewek dolnej i górnej warstwy uzwojenia stojana ($d_d = d_g$).

Każdy wariant ma cztery wersje zmian parametrów, umożliwiających uzyskanie optymalnego kształtu czół cewki uzwojenia stojana:

Wersja 1 - umożliwia projektowanie kształtu czół cewek przy zadanym wysięgu promieniowym w_p i osiowym w_{os}, przy czym kąt nachylenia tworzącej stożka dolnej warstwy γ_d = var.

Wersja 2 - umożliwia projektowanie kształtu czół cewek przy zadanym wysięgu osiowym w_{os} oraz wymaganej odległości między bokami górnej warstwy czół.

Wersja 3 - umożliwia projektowania kształtu czół cewek przy zadanym wysięgu promieniowym w_p oraz wymaganej odległości między bokami górnej warstwy czół.

Wersja 4 - umożliwia projektowanie kształtu czół cewek przy zadanym wysięgu promieniowym w_p i osiowym w_{os}, przy czym kąt γ_d nachylenia tworzącej stożka dolnej warstwy czół jest wyznaczony wymiarami i poło żeniem pierścieni usztywniających.

Wersja **1** i **4** każdego wariantu jest dogodna do stosowania przy optymalizacji kształtu czół cewek uzwojeń stojanów silników już produkowanych lub remontowanych. Wersje **2** i **3** przydatne są bezpośrednio przy projektowaniu nowych silników elektrycznych dużej mocy.

W wersjach **1** i **4** każdego wariantu - przy zadanym wysięgu promieniowym w_p i osiowym w_{os} - wyznaczane są odległości d_j między głównymi łukami stożkowymi *6* sąsiednich półcewek uzwojenia stojana, możliwe do osiągnięcia przy zadanych wysięgach w_p i w_{os}.

W wersjach **2** i **3** każdego wariantu zadaje się wymaganą odległość między głównymi łukami stożkowymi *6* sąsiednich górnych półcewek, której uzyskanie jest realizowane przez dobór wysięgu promieniowego $w_p \rightarrow$ w wersji **2** oraz wysięgu osiowewgo $w_{os} \rightarrow$ w wersji **3**.

Dane do obliczeń konstruktorskich, których wielkości geometryczne zaznaczono na rys. 2, można podzielić na dwie grupy, odpowiednio uwzględniające:

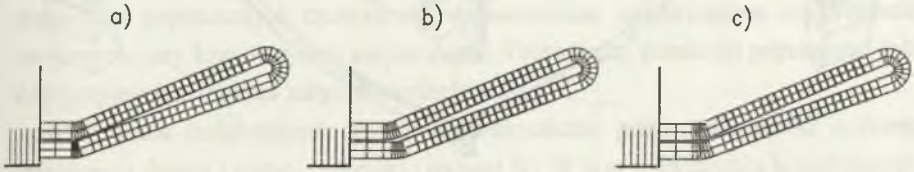
- rozwiązania obwodu elektromagnetycznego i układu izolacyjnego uzwojenia stojana,
- technologię wykonania cewki, w tym wymiary przekroju poprzecznego przewodów zwojowych oraz obróbkę cieplną stosowanej miedzi.

Grafika w programie **KUS** umożliwia analizę projektowanego kształtu czoła cewki na jej rzutach prostokątnych. Analizę przestrzenną umożliwia AutoCAD, po wcześniejszym opracowaniu programu w języku AutoLISP, który wykorzystuje wyniki obliczeń w programie **KUS** do kreślenia trójwymiarowych zarysów czoła cewki.

4. ZASADA PROJEKTOWANIA KSZTAŁTU CZOŁA CEWKI

Głównym zadaniem konstruktora jest dobór kształtu czoła cewki w strefie jej wykorbienia (łuki *3*, *4*, i *5* na rys. 2) i w strefie główki cewki (łuki *7*, *8* i *9*) oraz zapewniewnie wymaganej odległości między bokami głównych elementów stożkowych *6* sasiędnich półcewek.

W strefie łuków przejścia (o promieniach R_j) z części żłobkowej na stożkową półcewki nie mogą stykać się ze sobą (rys. 5a). Należy zapewnić odległość między dolną i górną warstwą, równą co najmniej grubości przekładki żłobkowej między warstwami uzwojenia stojana.

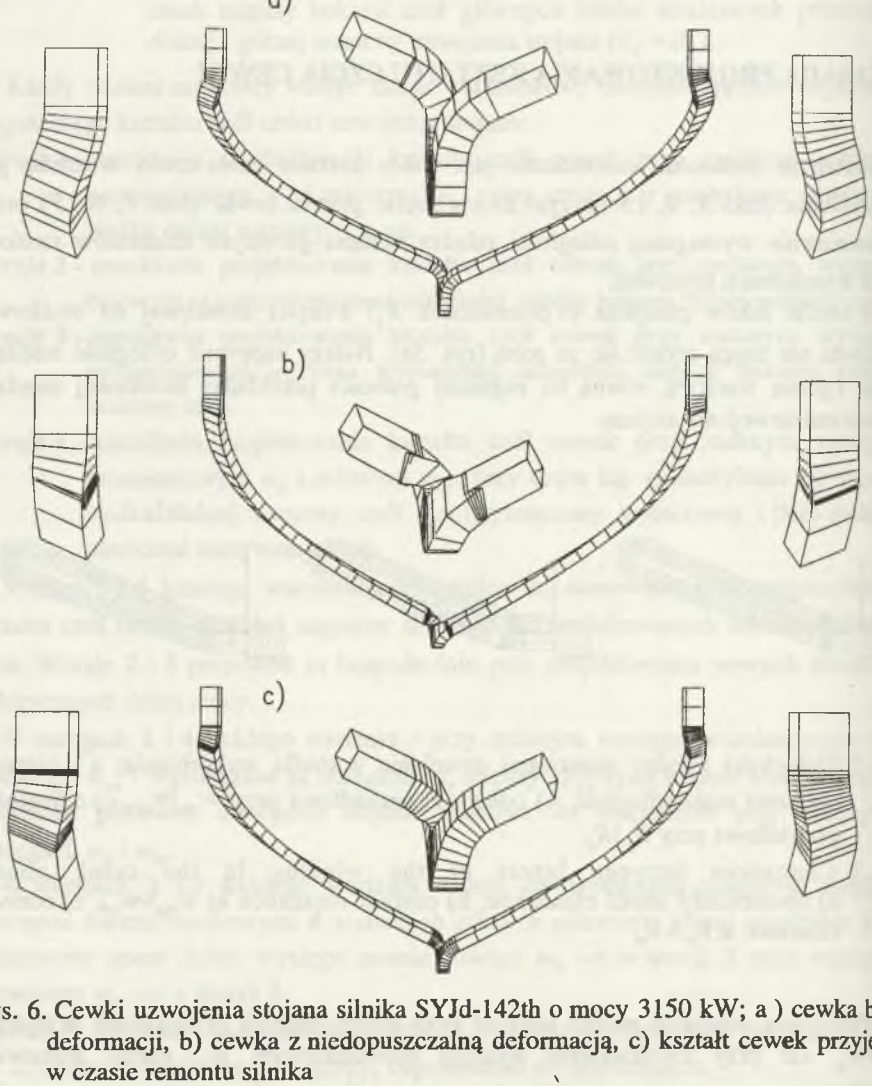


Rys. 5. Odległości między warstwami uzwojenia w strefie wykorbienia; a) nieprawidłowo mała odległość, b) odległość prawidłowa przy $w_{og} \rangle w_{od}$, c) odległość prawidłowa przy $R_g \rangle R_d$

Fig. 5. Clearances between layers of the winding in the crank zone; a) abnormally small clearance, b) correct clearance at $w_{og} > w_{od}$, c) correct clearance at $R_g > R_d$

Wymaganą odległość można uzyskać przy takich samych promieniach przejścia $R_d = R_g$, ale przy zwiększonym wysięgu prostoliniowym w_{os} górnej półcewki (rys. 5b) albo przy takich samych wysięgach prostoliniowych, a większym promieniu gięcia R_g górnej półcewki (rys. 5c). Warunek ten można także spełnić drogą pośrednią.

Przy zerowych długościach łuków *4* i *8*, które występują przy $\gamma_{1j} = \gamma_{2j} = 0$, otrzymuje się łagodne łuki przejścia między elementami czoła cewki w strefie wykorbienia i w strefie główki cewki (rys. 6a) oraz nie występuje deformacja prostokątnych przekrojów poprzecznych czoła cewki. W tym rozwiązaniu istnieje



Rys. 6. Cewki uzwojenia stojana silnika SYJd-142th o mocy 3150 kW; a) cewka bez deformacji, b) cewka z niedopuszczalną deformacją, c) kształt cewek przyjęty w czasie remontu silnika

Fig. 6. Coils of the stator windings of an SYJd-142th motor with a power-raing of 3150 kW; a) coil without any deformation, b) coil with an inadmissible deformation, c) coil shape asssumed during the repair of the motor

konieczność zwiększenia wysięgu promieniowego w_p lub osiowego w_{os} dla uzyskania założonej odległości między bokami łuków stożkowych *6*.

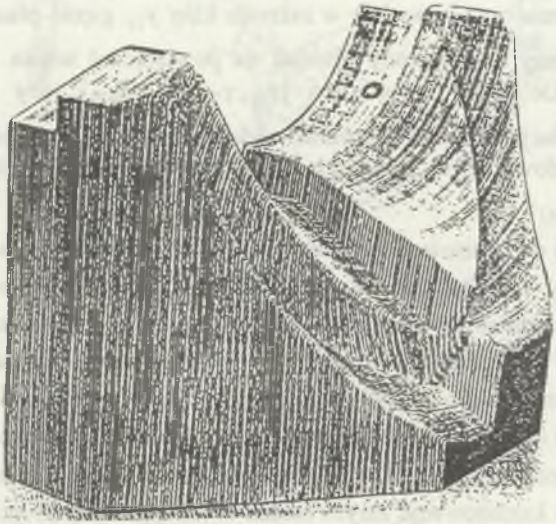
W silnikach indukcyjnych dużej mocy najczęściej skraca się długości łuków *3* i *9* i wprowadza się łuki przestrzenne *4* i *8* ($\gamma_{1j} > 0$ i $\gamma_{2j} > 0$). Powoduje to w zakresie kąta γ_{1j} (rys. 1) gięcie płaskiego łuku przejścia między prostoliniowym wysięgiem żłobkowym i zarysem stożkowym czoła półcewki w łuk przestrzenny *4*, poło żony na powierzchni torusa oraz powoduje w zakresie kąta γ_{2j} gięcie płaskiej główki cewki w łuk przestrzenny *8*, poło żony również na powierzchni torusa. Konstruktor musi wprowadzić takie dane do obliczeń ($\gamma_{1j}, \gamma_{2j}, R_{e1j}, R_{e2j}$), aby nie wystąpiło pofałdowanie izolacji i miedzi w strefie wykorbienia oraz w strefie główki cewki (rys. 6b). Pofałdowanie to występuje przy dużych kątach γ_{1j} i γ_{2j} oraz małych promieniach R_{e1j} i R_{e2j}.

W zależności od technologii wykonania kształtu czoła cewki (kształtowanie ręczne na szablonach lub kształtowanie na specjalnych rozciągarkach) wybiera się najczęściej rozwiązanie pośrednie, dopuszczające ewentualnie nieznaczne załamanie linii zarysu wierzchołków prostokątnego przekroju poprzecznego czoła cewki w strefie wykorbienia oraz w strefie główki cewki (rys 6c). Takie rozwiązanie może być przyjęte, ponieważ w strefie łuku *4* i *8* występuje częściowa deformacja prostokątnych przekrojów poprzecznych czoła cewki, spowodawana przesuwaniem się przewodów zwojowych przy kształtowaniu zarysu cewki. Prostokątne przekroje poprzeczne łuków *4* i *8* przyjmują wówczas zarys równoległoboku.

W silnikach indukcyjnych stosuje się dotychczas przeważnie cewki o równych długościach dolnej i górnej półcewki (wariant **B**). W tym rozwiązaniu konstrukcyjnym cewki odległość między bokami głównych łuków stożkowych *6* $d_g < d_d$ oraz kąt rozpiętości półcewek $\delta_g \rangle \delta_d$, a wstępne nawijanie cewki wykonuje się na dwóch rolkach o zadanym promieniu R_{dg}. Zastosowanie w silnikach indukcyjnych cewek obliczanych według wariantu **C**, który umożliwia uzyskanie kształtu czół cewek zapewniającego równą odległość w dolnej i górnej warstwie uzwojenia stojana, zapewnia uzyskanie większej odległości między bokami czół górnej warstwy, przy tych samych wymiarach wysięgu promieniowego i osiowego. Wstępne nawijanie cewki zaprojektowanej według wariantu **C** wykonuje się na szablonie o zarysie trapezu.

Kształtowanie czół cewek uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy wykonuje się w kraju przeważnie ręcznie na szablonach, których zarysy były najczęściej wykonywane metodą doświadczalną. W ramach współpracy z Zakładami EMIT w Żychlinie zaprojektowano w programie **KUS** kształty czół cewek dla silników dwubiegunowych. Wykonano dla tych silników szablony kształtujące czoła cewek na

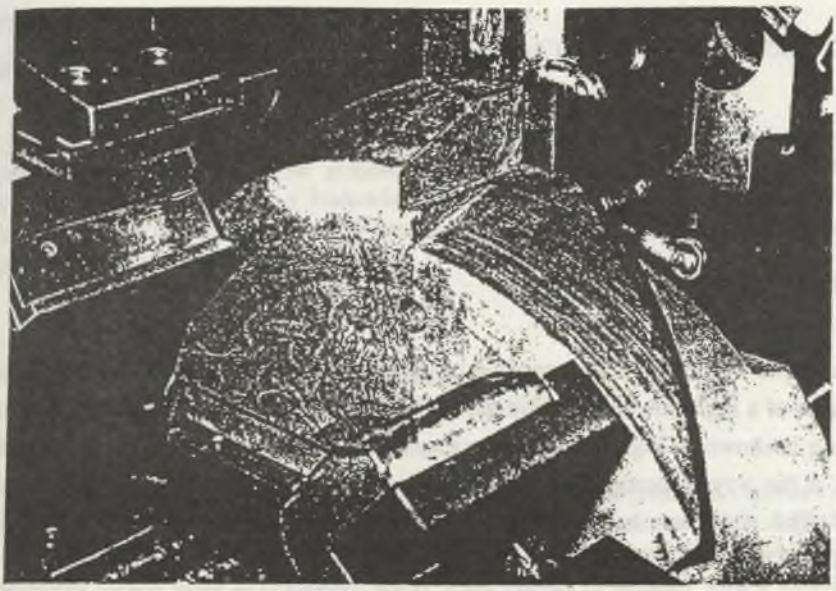
zaprojektowanym i wykonanym urządzeniu obróbkowym [3]. Urządzenie to umożliwia wykonanie w jednym zamocowaniu półfabrykatu pełnego zarysu szablonu kształtującego czoło cewki z wyzyskaniem wyników obliczeń komputerowych kształtu czoła cewki uzwojenia stojana. Wykonany na tym urządzeniu obróbkowym szablon, kształtujący czoła cewek silnika SCF-355-M2, a przeznaczony do ręcznego kształtowania czół cewek, przedstwiono na rys. 7.



Rys. 7. Szablon do ręcznego kształtowania czół cewek stojana silnika SCF-355-M2
Fig. 7. Stencil for the manual shaping of the end windings of the stator of an SCF-355-M2 motor

Od kilku lat wprowadzane jest w kraju maszynowe kształtowanie czół cewek tych silników na rozciągarkach firmy Maxei. Praktyka obliczeniowa i doświadczalna wykazała, że przy maszynowym kształtowaniu czół cewek uzwojeń stojanów silników cztero i więcej biegunowych nie jest konieczne stosowanie dodatkowych szablonów kształtujących (ewentualnie tylko segmenty stożków), ponieważ główny łuk stożkowy *6* czoła uzwojenia takiego silnika leży prawie w płaszczyźnie. Przy maszynowym kształtowaniu czół cewek silników dwubiegunowych należy stosować segmenty szablonów kształtujących główne łuki stożkowe *6* czoła cewki. Segmenty szablonów kształtujących, można wykonać za pomocą specjalnych urządzeń obróbkowych [3, 4]. W ramach współpracy z Wydziałem Remontowym Maszyn Elektrycznych Huty "Katowice" wykonano i sprawdzono szablony (rys. 8) kształtujące czoła cewek silnika SCDm 102s na rozciągarce firmy Maxei.

Doświadczenia uzyskane przy wprowadzaniu w praktyce przemysłowej przedstawionej metody konstrukcji kształtu czół cewek uzwojeń stojanów w ww. Zakładach oraz w Zakładach Remontowych Maszyn Elektrycznych w Gliwicach dla silników elektrycznych w zakresie mocy 160 kW do 6000 kW (nisko- i wysokonapięciowych), wskazują na łatwy dobór prawidłowego kształtu czół cewek przy wyzyskaniu wspomagania komputerowego w projektowaniu kształtu czół cewek uzwojenia stojana.



Rys. 8. Szablon kształtujący czoła cewek silnika SCDm 102s na rozciągarce f-my Maxei
Fig. 8. Stencil for the formation of the end windings of an SCDm 102s motor on a Maxei-stretcher

LITERATURA

[1] Drak B.: Kształtowanie czół uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Energetyka 1986, nr 3.

[2] Drak B.: Geometria i kształtowanie czół uzwojeń stojanów maszyn indukcyj- nych dużej mocy. Z .N.Pol.Śl., seria Elektryka z. 110, Gliwice 1990.

[3] Drak B.: Urządzenie do frezowania szablonów kształtujących czoła cewek uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Pat. 158375, 1992.
[4] Drak B.: Kształtowanie czół uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Zesz. Prob. BOBRME, Katowice, zesz. nr 46, 1993.
[5] Drak B., Paszek S.: Program KUS do obliczeń kształtu czół cewek stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Praca Inst. Masz. i Urz. El. nr 8, 1993.

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994 r.

Abstract

The paper deals with a new method of designing the shape of the end windings of the stator of a high-power induction motor. The way of designing the shape of the end winding is shown in Figs. 2 and 3. The essential difference from the methods applied so far is the way of designing the main cone arc of the end winding, as presented in Fig. 3. The equations 1÷7 express fundamental relations concerning the analytical notation of the full profile of the end windings of the stator. Basing on this notation the computer program aiding the design of the end windings of the stator was set up for various structural solutions. The results of the computer program enebles to prepare stencils for the formation of the end windings of the stator by means of specially developed and constructed devices [L. 3 and 4]. The stencil for the manual formation of end windings is presented in Fig. 7, whereas in Fig. 8 a stencil for the formation of end windings by means of a Maxei stretcher is shown. The method of computer-aided formation of the end windings of the stator presented in this paper has proved to be of good use on an industrial scale.