

Bronisław DRAK
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

ANALIZA SIŁ ELEKTRODYNAMICZNYCH DZIAŁAJĄCYCH NA CZOŁA UZWOJEŃ STOJANÓW SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY

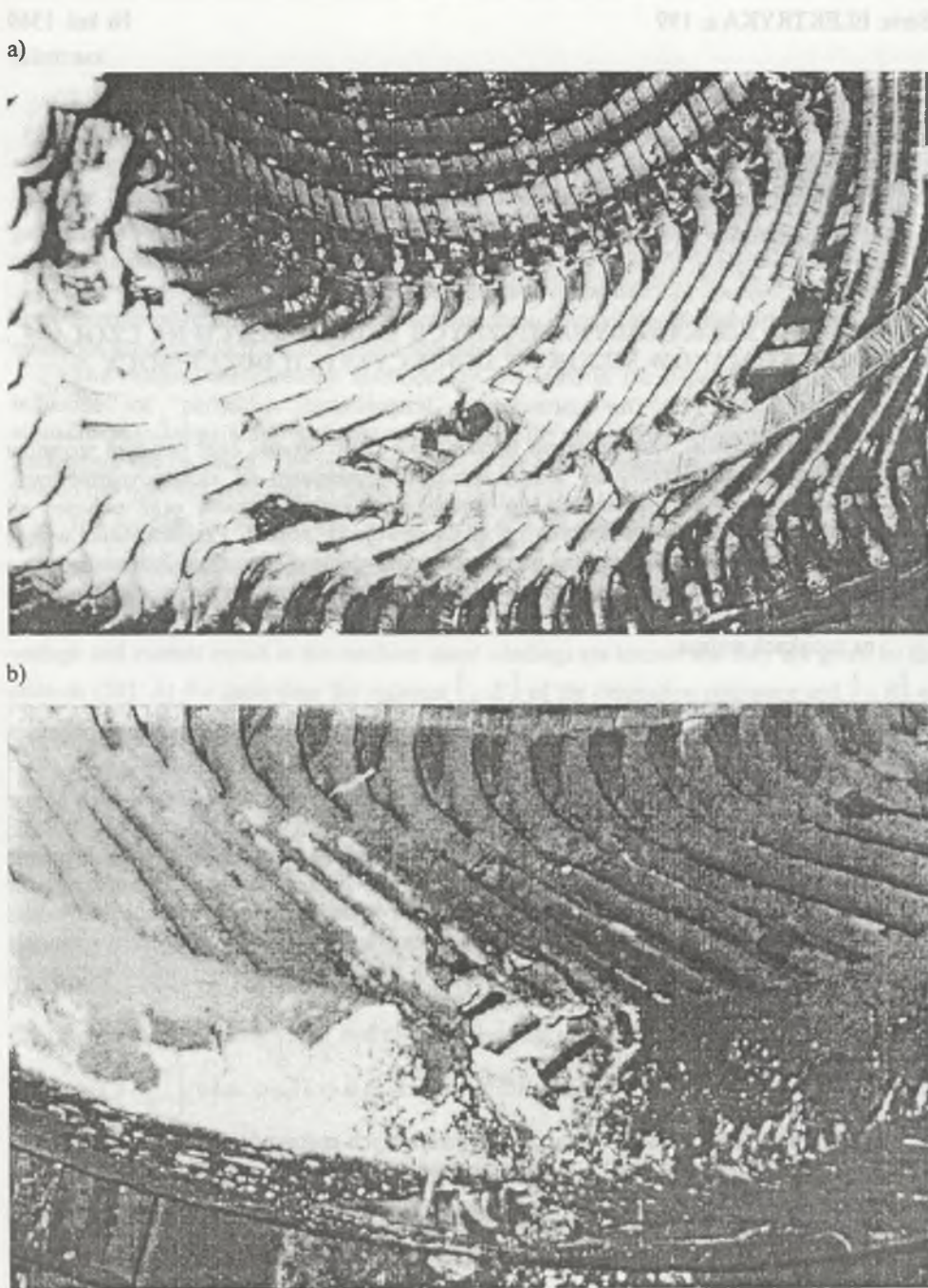
Streszczenie. Przedstawiono przykładowe odkształcenia czoł uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy, wywołane działaniem sił elektrodynamicznych. Podano podstawowe zależności do wyznaczania kształtu cewek oraz obliczeń sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojenia stojana. Przedstawiono wpływ geometrii czoł uzwojenia stojana na ich podatność elektrodynamiczną. Przeanalizowano siły elektrodynamiczne działające na czoła uzwojenia stojana przy rozruchu silnika od zerowej prędkości obrotowej oraz przy powtórny jego rozruchu i napięciu resztkowym na zaciskach stojana.

ANALYSIS OF ELECTRODYNAMICS FORCES OPERATING ON FRONTS OF STATOR WINDING OF HIGH POWER INDUCTIVE ENGINE

Summary. Exemplary deformations of the stator winding fronts of the high power induction motors caused by electrodynamic force action are presented in the paper. Basic relationships which enable to determine the coils shape and calculate electrodynamic forces acting on the stator winding fronts are given. Influence of geometry of the stator winding fronts on their electrodynamic flexibility is also presented. The electrodynamic forces acting on the stator winding fronts when starting the motor from zero rotational speed and when starting it the second time in the presence of the residual voltage on stator terminals are analysed in the paper well.

1. WSTĘP

Dane statystyczne ośrodków pomiarowo-badawczych energetyki oraz wieloletnie obserwacje skutków awaryjnych uszkodzeń silników indukcyjnych dużej mocy wskazują, że ponad 80% tych uszkodzeń występuje w uzwojeniach stojana. Dotyczy to przede wszystkim zwarc zwojowych, zwarc do pakietu stojana oraz deformacji czoł uzwojenia stojana, wywołanych działaniem sił elektrodynamicznych w stanach zwarcowych. Awaryjne uszkodzenia występują zarówno w silnikach o typowych usztywnieniach czoł uzwojenia stojana (rys. 1.1a), jak i w silnikach o wzmocnionym usztywnieniu główek czoł uzwojenia w pierścieniu, wypełnionym żywicami epoksydowymi (rys. 1.1b).



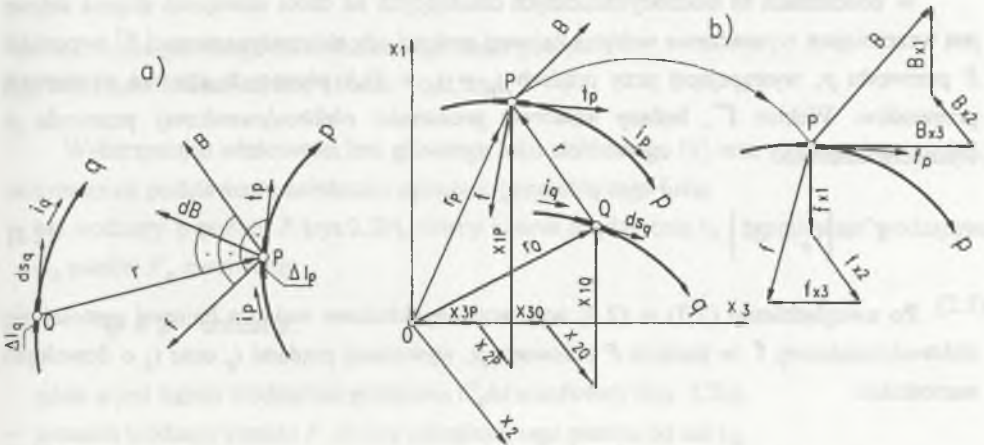
Rys. 1.1. Deformacje czół uzwojenia stojana: a) o typowym usztywnieniu, b) o usztywnieniu główek cewek w pierścieniu

Fig. 1.1. Deformation of stator winding fronts: a) typical stiffening, b) stiffening of coil heads in a ring

2. POSTAWY OBLICZEŃ SIŁ ELEKTRODYNAMICZNYCH

Obliczenia sił elektrodynamicznych, działających na czoła uzwojenia stojana, opiera się na metodzie wykorzystującej równania Laplace'a i prawa Biota-Savarta do wyznaczania oddziaływań elektrodynamicznych między dwoma przewodami przewodzącymi prąd elektryczny. Kształt tych przewodów opisuje się równaniami parametrycznymi w stacjonarnym układzie współrzędnych prostokątnych x_w ($w = 1, 2, 3$), przedstawionym na rys. 2.1.

Elementarny wektor indukcji magnetycznej $d\mathbf{B}$ w punkcie P przewodu p (rys. 2.1a), wywołanej prądem i_q płynącym w wycinku Δl_q przewodu q , jest prostopadły do płaszczyzny utworzonej przez ten punkt oraz wektor $d\mathbf{s}_q$, styczny do przewodu q w punkcie Q .



Rys. 2.1. Oddziaływanie elektrodynamiczne między przewodami p i q

Fig. 2.1. Electrodynamic interaction between conductors p and q

Wypadkowy wektor indukcji magnetycznej \mathbf{B} w punkcie P - wywołanej prądem i_q płynącym w przewodzie q o długości l_q - wyznacza zależność

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_q} \frac{[d\mathbf{s}_q \times \mathbf{r}]}{|\mathbf{r}|^3} i_q, \quad (2.1)$$

w której:

- μ_0 - przenikalność magnetyczna w próżni,
- $d\mathbf{s}_q$ - wektor elementarny, styczny do przewodu q w punkcie Q ,
- \mathbf{r} - wektor o długości $|\mathbf{r}|$ równej odległości punktu Q od punktu P ,
- i_q - prąd w przewodzie q , płynący zgodnie ze zwrotem wektora $d\mathbf{s}_q$.

Wektor liniowej gęstości siły elektrodynamicznej \mathbf{f} w punkcie P elementarnego wycinka Δl_p przewodu p , wywołanej oddziaływaniem prądu i_p tego przewodu na pole magnetyczne \mathbf{B} w tym punkcie, wytworzone przez prąd i_q , jest równy

$$\mathbf{f} = i_p [\mathbf{t}_p \times \mathbf{B}] = i_p i_q [\mathbf{t}_p \times \mathbf{B}^*], \quad (2.2)$$

gdzie:

\mathbf{t}_p – wektor jednostkowy, styczny do przewodu p w punkcie P ,

\mathbf{B}^* – wektor indukcji magnetycznej w punkcie P , wywołany prądem $i_q = 1\text{kA}$,

i_q – prąd w przewodzie p , płynący zgodnie ze zwrotem wektora \mathbf{t}_p .

W obliczeniach sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojenia stojana celowe jest wcześniejsze wyznaczenie wektora liniowej gęstości siły elektrodynamicznej \mathbf{f}^* w punkcie P przewodu p , występującej przy prądach $i_p = i_q = 1\text{kA}$ płynących zgodnie z orientacją przewodów. Wektor \mathbf{f}^* , będący *wektorem podatności elektrodynamicznej* przewodu p , wyznacza zależność

$$\mathbf{f}^* = [\mathbf{t}_p \times \mathbf{B}^*]. \quad (2.3)$$

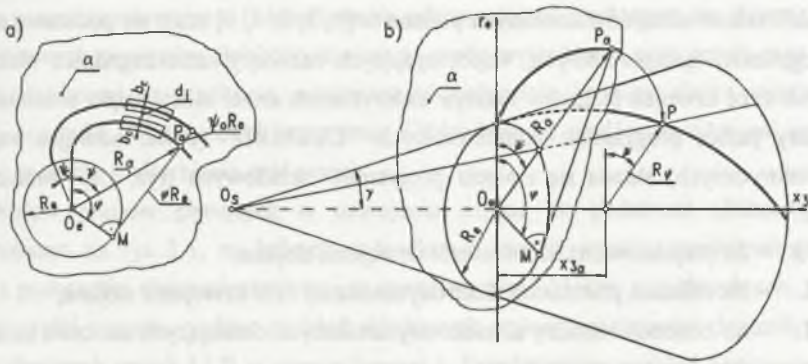
Po uwzględnieniu (2.3) w (2.2) wyznacza się składowe wektora liniowej gęstości siły elektrodynamicznej \mathbf{f} w punkcie P przewodu p , wywołanej prądami i_p oraz i_q o dowolnych wartościach

$$\mathbf{f} = \text{col}(f_{xw}) = i_p i_q \text{col}(f_{xw}^*), \quad (2.4)$$

przy czym prądy w przewodach p i q , płynące zgodnie z ich orientacją, uważa się za dodatnie.

Czoła cewek uzwojenia stojana silnika indukcyjnego dużej mocy są ułożone na dwóch powierzchniach stożkowych. Główny łuk stożkowy czoła półcewki jest kładem ewolwenty okręgu bezpośrednio na pobocznicy 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 pobocznicy stożka w okręgu o promieniu R_e (rys. 2.2).

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 $O_e M$ okręgu podstawowego ewolwenty. Przez obrót punktu P_α wokół punktu O_e w płaszczyźnie przechodzącej przez promień R_α i oś x_3 otrzymuje się punkt P w przebiciu pobocznicy stożka przez okrąg obrotu punktu P_α . Punkt P jest jednym z punktów krzywej, na której leży linia średnia głównego łuku czoła półcewki.



Rys. 2.2. Linia głównego łuku stożkowego czoła półcewki
 Fig. 2.2. Main conical arc line of semi - coil front

Wykorzystując właściwości linii głównego łuku stożkowego [1] oraz oznaczenia z rys. 2.2, otrzymuje się podstawowe zależności opisujące geometrię tego łuku:

- kąt wodzący ψ punktu P (rys.2.2b), równy kątowi między osią r_e i promieniem wodzącym R_α punktu P_α ewolwenty

$$\psi = \varphi - \arctan \varphi, \tag{2.5}$$

gdzie φ jest kątem wodzącym promienia O_eM ewolwenty (rys. 2.2b),

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

$$R_\varphi = R_e \left(\cos^2 \gamma + \sin \gamma \sqrt{\sin^2 \gamma + \varphi^2} \right), \tag{2.6}$$

gdzie promień okręgu podstawowego ewolwenty

$$R_e = \frac{Q_s(b_c + d)}{2\pi}, \tag{2.7}$$

przy czym:

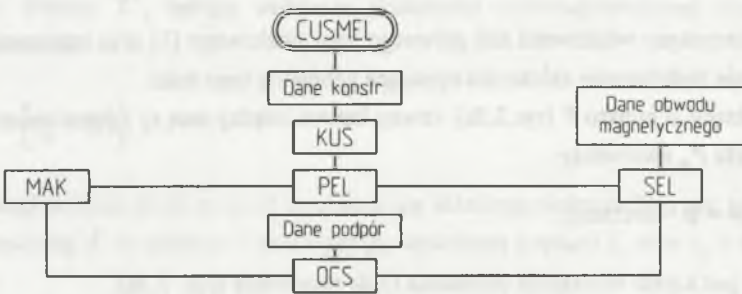
- Q_s – liczba zębów pakietu stojana,
- d – odległość między bokami głównych łuków stożkowych czół uzwojenia stojana, mierzona na płaszczyźnie α (rys. 2.2a),
- b_c – szerokość czoła cewki uzwojenia stojana,

- odległość punktu P od płaszczyzny α

$$x_{3\alpha} = R_e \cos \gamma \left(\sqrt{\sin^2 \gamma + \varphi^2} - \sin \gamma \right). \tag{2.8}$$

Powyższe zależności oraz algorytmy obliczeń dotyczące wyznaczenia kształtu czoł cewek i obliczeń sił elektrodynamicznych podane w [1, 2, 3, 4, 9] stały się podstawą opracowania programów komputerowych, wspomagających rozwiązywanie zagadnień elektromechanicznych czoł uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego. Opracowany pakiet programów komputerowych "CUSMEL" (cewki uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych) składa się z pięciu programów składowych (rys. 2.3), a mianowicie programu:

- KUS** – do projektowania kształtu czoł uzwojenia stojana,
- PEL** – do obliczeń podatności elektrodynamicznej czoł uzwojenia stojana,
- SEL** – do obliczeń i analizy sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojenia stojana,
- MAK** – do obliczeń macierzy kształtu czoł uzwojenia stojana,
- OCS** – do obliczeń i analizy odkształceń czoła wybranej cewki uzwojenia stojana.



Rys. 2.3. Schemat programu CUSMEL

Fig. 2.3. Scheme of CUSMEL - programme

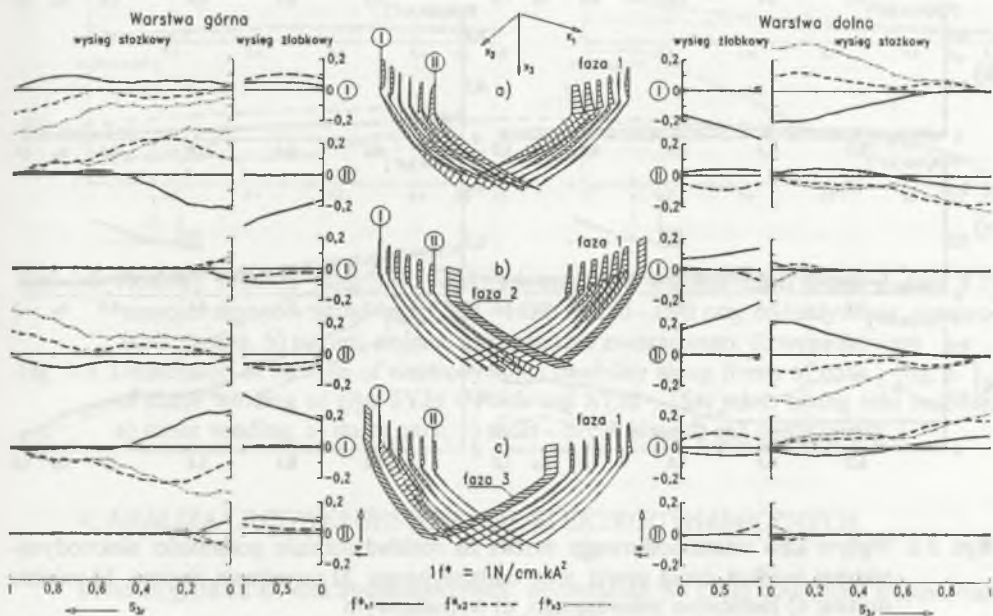
3. ANALIZA PODATNOŚCI ELEKTRODYNAMICZNEJ CZÓŁ UZWOJENIA STOJANA

Obliczenie podatności elektrodynamicznej czoł uzwojenia stojana poprzedza obliczenia i analizę sił elektrodynamicznych. Zależy ona od kształtu czoł uzwojenia, wzajemnej konfiguracji czoł uzwojenia stojana i wirnika oraz wymiarów przestrzeni, w której znajdują się czoła uzwojenia stojana. Podatność elektrodynamiczną czoła uzwojenia stojana oblicza się przez superpozycję oddziaływań elektrodynamicznych prądów jednostkowych, płynących zgodnie z orientacją zastępczych przewodów uzwojenia stojana i wirnika oraz ich odbić zwierciadlanych względem ścian granicznych.

Wyniki obliczeń wskazują, że skrajne cewki w każdej grupie fazowej mają największe wartości podatności elektrodynamicznej. Rozkład podatności elektrodynamicznej wzdłuż długości czoła cewki zależy od jej położenia względem cewek tej samej fazy oraz cewek innych faz.

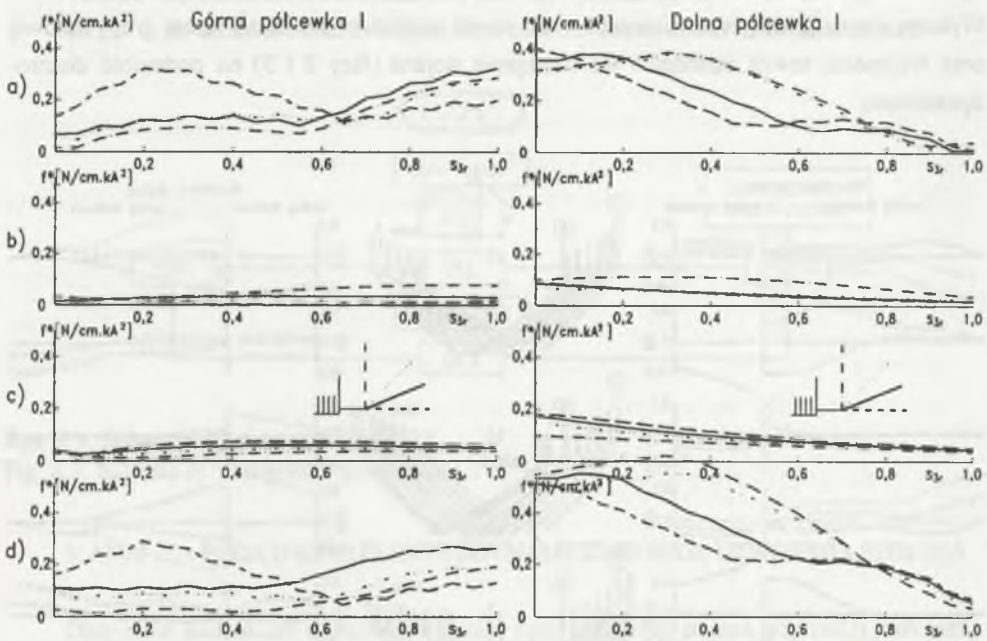
Największy wpływ na wypadkową podatność elektrodynamiczną mają prądy jednostkowe, płynące w uzwojeniu stojana. Oddziaływanie pakietu stojana uwidacznia się głównie w strefie prostoliniowych wysięgów żłbkowych oraz w strefie wykorbienia czół cewek przy przejściu z części żłbkowej na stożkową, natomiast oddziaływanie korpusu silnika uwidacznia się bardziej w strefie główek cewek uzwojenia. Oddziaływanie prądów wirnika jest szczególnie wyraźne w strefie wykorbienia czół cewek.

Wpływ prądów płynących w uzwojeniu stojana na podatność elektrodynamiczną uwidoczniło na rys. 3.1, na których w środkowej części rysunku przedstawiono rozkład wektora podatności elektrodynamicznej w przestrzennym układzie współrzędnych, a w lewej i prawej części rysunku podano rozkład składowych wektora podatności elektrodynamicznej wzdłuż skrajnych cewek I i II w grupie fazowej 1. Przedstawiony rozkład podatności elektrodynamicznej dotyczy czół uzwojenia stojana silnika typu SZJd-142th o mocy 3150 kW. Wykresy obrazują wpływ usytuowania czoła cewki względem cewek tej samej grupy fazowej oraz względem cewek sąsiednich faz uzwojenia stojana (fazy 2 i 3) na podatność elektrodynamiczną.



Rys. 3.1. Rozkład podatności elektrodynamicznej czół uzwojeń stojana silnika SYJd-142th o mocy 3150 kW od prądów płynących w uzwojeniach: a) fazy 1, b) fazy 2, c) fazy 3
 Fig. 3. 1. Electrodynamic flexibility distribution of stator winding fronts of the motor SYJd - 142 th - power 3150 kW from currents flowing in windings: a) phase 1, b) phase 2, c) phase 3

Wpływ kątów wierzchołkowych stożków, na których są rozłożone czoła uzwojenia stojana, przedstawiono na rys. 3.2. Wykresy te dotyczą skrajnej cewki I (zaznaczonej na rys. 3.1) w grupie fazowej 1. Na wykresach przedstawiono rozkład modułu podatności elektrodynamicznej wzdłuż głównych łuków stożkowych uwzględniający oddziaływanie prądów jednostkowych w uzwojeniu stojana i w pierścieniu zwierającym klatkę wirnika oraz oddziaływanie pakietu stojana. Pominięto oddziaływanie obudowy silnika, gdyż zależy on od jej rozwiązania konstrukcyjnego. Z wykresów wynika, że ze wzrostem kąta nachylenia czoł względem osi podłużnej stojana wzrasta oddziaływanie prądów w uzwojeniu stojana oraz oddziaływanie pakietu stojana, a maleje oddziaływanie prądów w pierścieniu zwierającym klatkę wirnika. Im większy kąt nachylenia czoł, tym większa jest ich wypadkowa podatność elektrodynamiczna, a w szczególności skrajnych cewek w grupach fazowych.

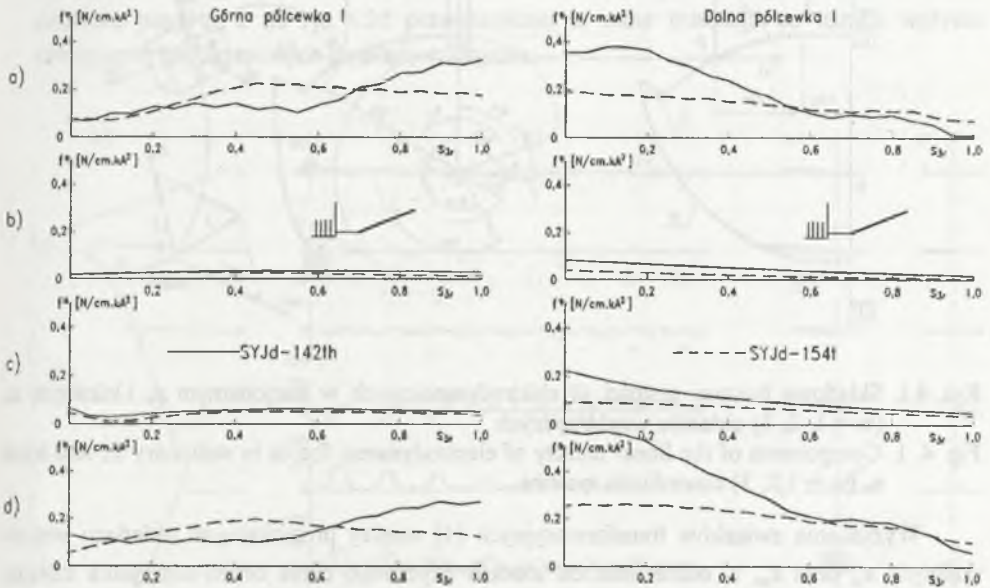


Rys. 3.2. Wpływ kąta wierzchołkowego stożka na rozkład modułu podatności elektrodynamicznej wzdłuż czoła cewki przy oddziaływaniu: a) uzwojenia stojana, b) pakietu stojana, c) pierścienia zwierającego, d) wypadkowym

Fig. 3. 2. Influence of the cone apex angle on distribution of electrodynamic flexibility magnitudes absolute value along the front of a coil when taking into account: a) stator winding, b) stator pack, c) short - circuit ring, d) resultant

Największa podatność elektrodynamiczna występuje w czołach uzwojeń stojanów dwubiegunowych o dużej ilości zębów w pakiecie stojana. Wynika to z dużej ilości cewek

w poszczególnych grupach fazowych oraz długości czoł, wynikającej z rozpiętości kątowej cewek uzwojenia stojana. Podatność elektrodynamiczna czoł maleje ze wzrostem liczby par biegunów silnika. Uwidoczniają to wykresy modułów podatności elektrodynamicznej przedstawione na rys. 3.3 dla silnika typu SYJd-142th o mocy 3150 kW i $2p = 2$ (linia ciągła) oraz dla silnika SYJd-154t o mocy 6300 kW i $2p = 4$ (linia kreskowa).



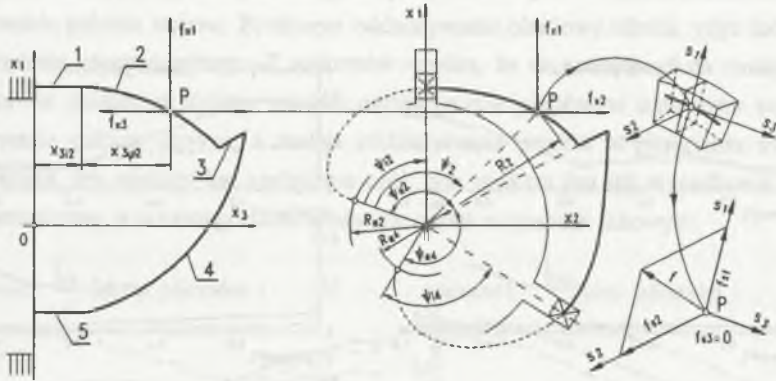
Rys. 3.3. Rozkład modułu podatności elektrodynamicznej wzdłuż czoł cewek I (rys. 3.1) uzwojeń stojanów silnika typu SYJd - 142th i SYJd - 154t przy oddziaływaniu: a) uzwojenia stojana, b) pakietu stojana, c) pierścienia zwierającego, d) wypadkowym
 Fig. 3.3. Distribution of module of electrodynamic flexibility along fronts of coils I (fig. 3. 1.) of stator winding of type SYJd - 142th and SYJd - 154t when taking into account: a) stator winding, b) stator pack, c) short - circuit ring, d) cell components

4. ANALIZA LINIOWEJ GĘSTOŚCI SIŁ ELEKTRODYNAMICZNYCH

Linową gęstość sił elektrodynamicznych, działających na czoła uzwojenia stojana maszyny elektrycznej, oblicza się po wcześniejszym wyznaczeniu:

- składowych f_{st}^* wektora podatności elektrodynamicznej czoł, które dla danego silnika wyłącznie zależą od kształtu czoł uzwojeń i obwodów zastępczych oraz wymiarów przestrzeni, w której są one usytuowane,
- prądów uzwojenia stojana i wirnika.

W obliczeniach skutków działania sił elektrodynamicznych na czoła cewek uzwojenia stojana, w tym momentów gnących i skręcających czoła cewek, naprężeń i ugięć czoł, dogodniejsza jest znajomość składowych liniowej gęstości sił elektrodynamicznych w lokalnym układzie współrzędnych s_w ($w = 1, 2, 3$), uwidocznionym na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Składowe liniowej gęstości sił elektrodynamicznych w stacjonarnym x_w i lokalnym s_w ($w = 1, 2, 3$) układzie współrzędnych
 Fig. 4.1. Components of the linear density of electrodynamic forces in stationary x_w and local s_w ($w = 1, 2, 3$) co-ordinate systems

Wyzyskanie związków transformacyjnych [4] między prostokątnymi układami współrzędnych x_w oraz s_w , w odniesieniu do modelu fizycznego czoła cewki uzwojenia stojana, umożliwia wyznaczenie składowych wektora liniowej gęstości sił elektrodynamicznych w lokalnym układzie współrzędnych s_w . Współrzędne tego wektora wynoszą

$$\mathbf{f}^* = \text{col}(f_{s_w}) = [f_{s_w}(n_q)]_{n_q \times w} \text{col}(\mathbf{1})_{n_q} = [a_{wv}]_{w \times w} [f_{x_w}(n_q)]_{n_q \times w} \text{col}(\mathbf{1})_{n_q}, \quad (3.1)$$

gdzie:

f_{s_w} – wypadkowa w -ta składowa wektora liniowej gęstości sił elektrodynamicznych \mathbf{f} w lokalnym układzie współrzędnych s_w ,

$f_{s_w}(n_q)$ – w -ta składowa wektora \mathbf{f} w lokalnym układzie współrzędnych, uwzględniająca oddziaływanie prądów n_q -tej grupy uzwojenia,

$f_{x_w}(n_q)$ – w -ta składowa wektora \mathbf{f} w stacjonarnym układzie współrzędnych, uwzględniająca oddziaływania n_q -tej grupy uzwojenia,

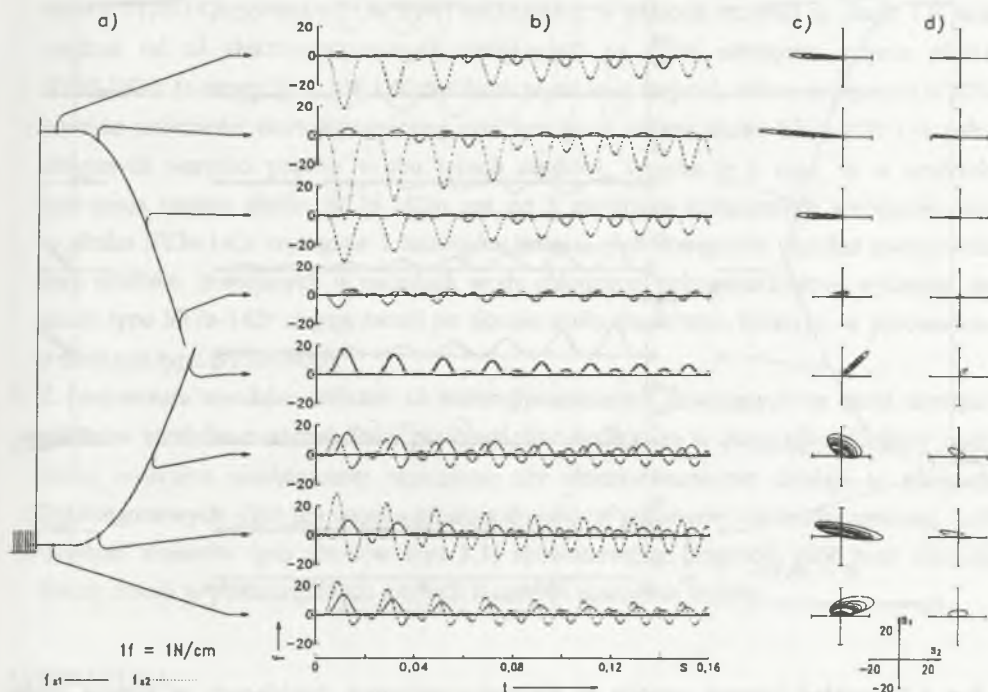
a_{wv} – cosinusy kątów transformacji między lokalnym i stacjonarnym układem współrzędnych,

$(\mathbf{1})_{n_q}$ – jednokolumnowa macierz jedynek w n_q wierszach.

Z uwagi na to, że siły elektrodynamiczne działają w płaszczyźnie prostopadłej do linii średniej zarysu czoła uzwojenia stojana w danym jej punkcie, dlatego składowa $f_{s_3} = 0$.

Rozkład liniowej gęstości sił elektrodynamicznych działających na skrajną cewkę I fazy A (rys. 3.1) przy rozruchu silnika SYJd-142th o mocy 3150 kW od zerowej prędkości obrotowej przedstawiono na rys. 4.2, przy czym:

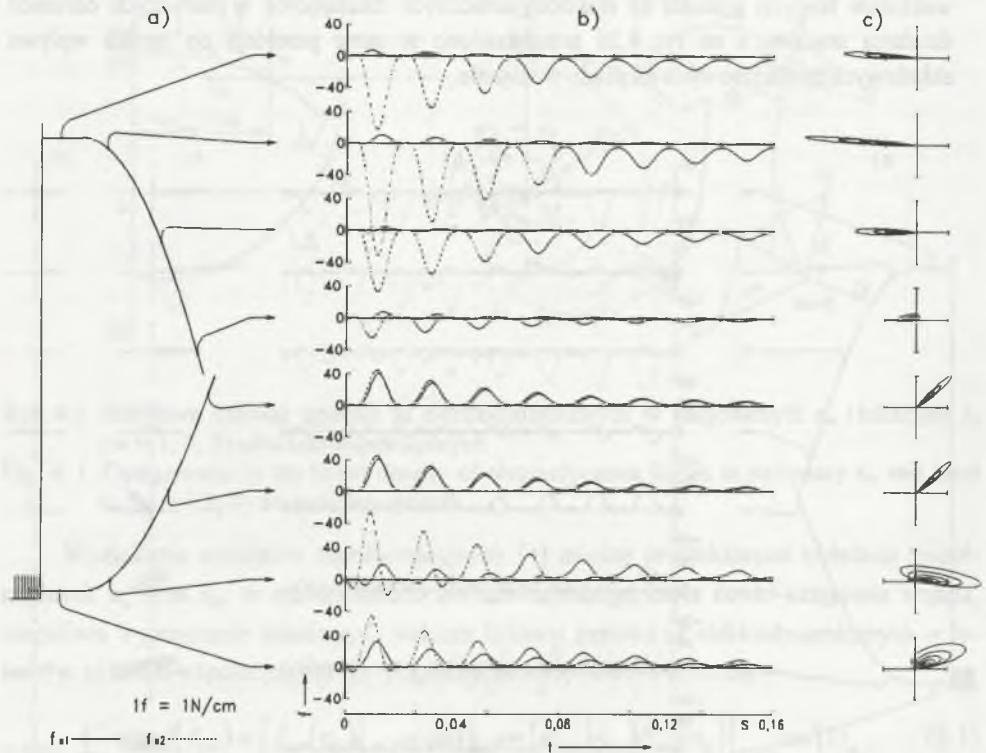
- na rys. 4.2b przedstawiono przebiegi czasowe liniowej gęstości sił elektrodynamicznych w pierwszych okresach działania prądów - w punktach zaznaczonych na rys. 4.2a
- na rys. 4.2c przedstawiono trajektorie w płaszczyźnie s_1 - s_2 (rys. 4.1) zakreślane przez końce wektorów liniowej gęstości sił elektrodynamicznych działających w pierwszych okresach działania prądów, a na rys. 4.2d przedstawiono te same przebiegi po zaniku wpływu składowych bezokresowych na prądy w stojanie.



Rys. 4.2. Rozkład liniowej gęstości sił elektrodynamicznych działających na skrajną cewkę fazy A przy rozruchu silnika SYJd - 142th od $s = 1$: a) charakterystyczne punkty na czole cewki, b) przebiegi czasowe sił w pierwszych okresach rozruchu, c) trajektorie wektorów sił w pierwszych okresach rozruchu, d) trajektorie wektorów sił po zaniku składowych bezokresowych prądów stojana

Fig. 4. 2. Distribution of the linear density of electrodynamic forces acting on the extreme coil of phase A where starting engine SYJd - 142th from $s = 1$: a) characteristic points on the coil front, b) waves of forces at the first period of starting, c) trajectories of the force vectors at the first period of starting, d) trajectories of the force vectors after decay of components of periodless stator currents

Na rys. 4.3 przedstawiono przebiegi czasowe liniowej gęstości sił elektrodynamicznych w zaznaczonych na rys. 4.3a punktach skrajnej cewki I (rys. 3.1) fazy A, działających w pierwszych okresach działania prądów przy powtórnym rozruchu silnika typu SYJd-142th od $s = 0,02$, po chwilowym zaniku napięcia zasilania.



Rys. 4.3. Rozkład liniowej gęstości sił elektrodynamicznych działających na skrajną cewkę fazy A przy powtórnym rozruchu silnika SYJd-142th od $s = 0,02$: a) charakterystyczne punkty na czole cewki, b) przebiegi czasowe sił w pierwszych okresach rozruchu, c) trajektorie wektorów sił w płaszczyźnie s_1-s_2

Fig. 4.3. Distribution of the linear density of electrodynamic forces acting on the extreme coil of phase A at the second starting of engine SYJd - 142th from $s = 0,02$: a) characteristic for points on the coil front, b) waves of forces at the first period of starting, c) trajectories of the force vectors on plane $s_1 - s_2$

Z analizy wyników przeprowadzonych obliczeń sił elektrodynamicznych dla różnych typów silników indukcyjnych dużej mocy wynikają przedstawione poniżej wnioski.

1. Siły elektrodynamiczne działają w płaszczyznach prostopadłych do linii zarysu czoł cewek uzwojenia stojana. Końce wektorów tych sił zakreślają w tych płaszczyznach krzywe

- zbliżone do elips (rys. 4.2, 4.3). Ich kształt zależy głównie od usytuowania przestrzennego punktów na czole cewki oraz rozpatrywanej cewki w poszczególnych grupach fazowych uzwojenia stojana.
2. Największe siły elektrodynamiczne działają na skrajne cewki w poszczególnych grupach fazowych uzwojenia stojana w chwili, w której w dwóch fazach płyną prądy o tych samych wartościach bezwzględnych, a w trzeciej fazie prąd ma wartość zerową.
 3. Wypadkowa składowych sił elektrodynamicznych w płaszczyźnie prostopadłej do osi silnika, działających na wszystkie czoła cewek uzwojenia stojana, jest równa zero.
 4. Wyniki obliczeń wykazują, że siły elektrodynamiczne działające na czoła uzwojenia stojana silnika SYJe-142r (o mocy 3150 kW i 48 żłobkach w pakiecie stojana) są około 1,8 raza większe od sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojenia stojana silnika SYJd-142th (o mocy 3150 kW i 60 żłobkach w pakiecie stojana), mimo mniejszych o 20% wartości podatności elektrodynamicznej czół uzwojenia stojana silnika SYJe-142r i w pełni zbliżonych wartości prądów w obu typach silników. Wynika to z tego, iż w cewkach uzwojenia stojana silnika SYJd-142th jest po 5 zezwojów połączonych szeregowo, zaś w silniku SYJe-142r występuje 7 zezwojów połączonych szeregowo. Analiza awaryjności tych silników, pracujących w napędach wody chłodzącej turbogeneratorów, wykazuje, że silniki typu SYJe-142r ulegają awarii po okresie około dwukrotnie krótszym w porównaniu z silnikami typu SYJd-142th.
 5. Z porównania wyników obliczeń sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojeń stojanów silników o różnej ilości par biegunów wynika, że w przypadku silników o tej samej wielkości mechanicznej największe siły elektrodynamiczne działają w silnikach dwubiegunowych. Fakt ten wynika głównie z większej podatności elektrodynamicznej czół uzwojeń stojanów tych silników (rys. 3.3) spowodowanej długością czół oraz większą ilością cewek w poszczególnych grupach fazowych uzwojenia stojana.

LITERATURA

1. Drak B.: Kształtowanie czół uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. *ENERGETYKA*, nr 3, str. 21 - 26, 1986.
2. Drak B.: Geometria i kształtowanie czół uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy. *ZN Pol. Śl. Gliwice, Elektryka*, z. 110, str. 139-160, 1990.
3. Drak B.: Komputerowe wspomaganie kształtowania czół uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. *ZN Pol. Śl. Gliwice nr 1245, Elektryka* z. 138, str. 185 - 198, 1994.
4. Drak B.: Wyznaczanie sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy. *ZN Pol. Śl. Gliwice Elektryka*, z. 110, str. 115-138, 1990.

5. Drak B.: Stan obciążenia elektrodynamicznego czół uzwojeń stojana maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego. ZN Pol. Śl. Gliwice, Mechanika, z. 107, str. 107-114, 1993.
6. Drak B.: Dobór miejsc usztywnień czół uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Zesz. Probl. Maszyny Elektryczne nr 16, BORME Katowice, str. 9 - 18, 1993.
7. Drak B.: Analiza przyczyn awarii silników potrzeb własnych elektrowni blokowych. Zesz. Probl. Maszyny Elektryczne nr 50, BORME Katowice, str. 121 - 126, 1995.
8. Drak B., Paszek S.: Program CUSMEL. Prace n-b Kat. Masz. i Urz. Elektr. Pol. Śl. Gliwice 1991-1993.
9. Paszek W.: Stany niestabilne maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT Warszawa 1986.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz
Profesor Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 kwietnia 1997 r.

Abstract

Electrodynamic forces acting on the stator winding fronts are often the cause of the motor failures, result which result in deformation of the fronts of stator windings (Fig. 1.1). In this article, computer analysis of electrodynamic forces acting on the stator winding fronts of induction motors of high power is presented. To calculate electrodynamic forces, the method using Laplace equation and Biot - Savarts law which determines electrodynamic interaction between two leads conducting current is applied. The shape of main conical arc of the coil front is assumed to be involute section of circle directly on cone side surface (Fig. 2. 2.). There was also made an estimation of influence of the stator winding front shape on value of electrodynamic flexibility of the coil fronts (Figs. 3. 2. and 3. 3.). There are given waves of electrodynamic forces acting on the stator winding fronts which are present at the moment of starting of the motor of 3150 kW from zero rotational speed and at second starting of the motor in the presence of the residual voltage on the stator terminals (Fig. 4.2 and 4.3).