

Bronisław DRAK  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

## SYMULACJA NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ CZÓŁ UZWOJEŃ STOJANÓW W STANACH AWARYJNYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY

**Streszczenie.** Przedstawiono typowe odkształcenia czół uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy, powstałe w czasie ich awarii. Omówiono programy komputerowe umożliwiające symulację odkształceń czół uzwojeń stojanów, wywołanych działaniem sił elektrodynamicznych. Podano wyniki symulacji naprężeń i odkształceń czół uzwojenia stojana silnika dwubiegunowego o mocy 3150 kW powstałych w czasie jego awarii.

## STRESS AND DEFORMATION SIMULATION OF STATOR WINDING FRONTS IN CASE OF FAILURES OF HIGH - POWER INDUCTION MOTORS

**Summary.** Typical deformation of stator winding fronts of high - power induction motors which appear during their failure have been presented in the paper. Computer programmes which enable to simulate stator winding front deformation caused by electrodynamic forces have been also discussed. Results of stress and deformation stimulation of the stator winding fronts of the two-speed motor of 3150 kW which appear during its failure are also given as well.

### 1. WSTĘP

W latach 1993 - 1996 prowadzono analizę awarii silników dużej mocy (160 do 3150 kW), stosowanych w napędach potrzeb własnych dwóch elektrowni blokowych i dwóch elektrociepłowni. Statystyka wykazuje, że zdecydowana większość uszkodzeń, obserwowanych po awarii tych silników, występowała w uzwojeniach stojana.

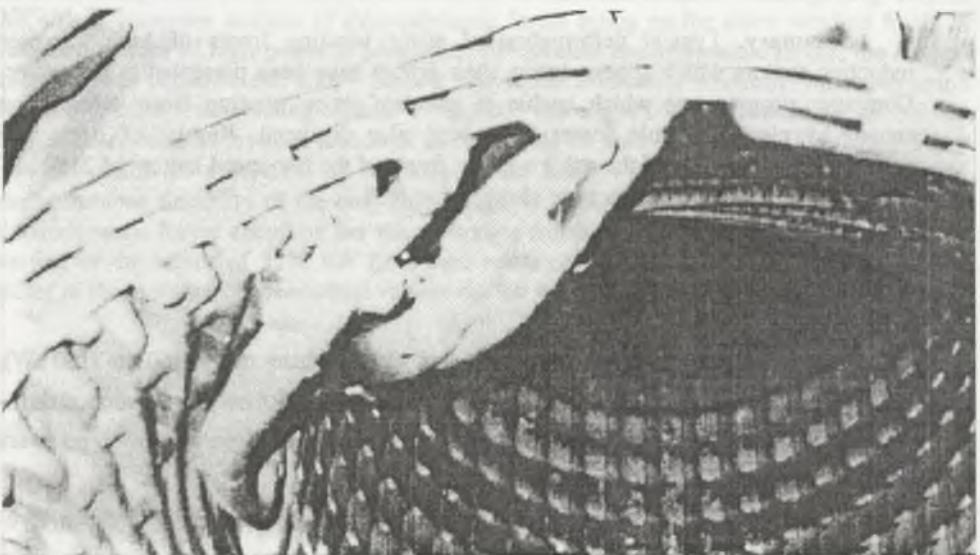
W wymienionej grupie silników awarie występują przede wszystkim w silnikach dwubiegunowych. Najbardziej typowym uszkodzeniem uzwojenia stojana w wyniku awarii silnika jest deformacja czół cewek, obejmująca głównie skrajne cewki w poszczególnych grupach fazowych uzwojenia stojana. Przykładowe deformacje czół cewek uzwojeń stojanów silników dwubiegunowych o mocy od 400 do 3150 kW przedstawiono na rys. 1.1. Niemal zawsze

występuje rozerwanie sznurowań przekładek dystansowych do czoł skrajnych cewek dwóch sąsiednich grup fazowych uzwojenia stojana. Większym deformacjom ulegają czoła górnej warstwy półcewek uzwojenia dwuwarstwowego, przy czym największym, czoła skrajnych cewek w grupach fazowych (rys. 1.1a). Dość często występuje wygięcie skrajnych górnych półcewek dwóch sąsiednich faz uzwojenia stojana w kierunku wału wirnika (rys. 1.1b).

a)



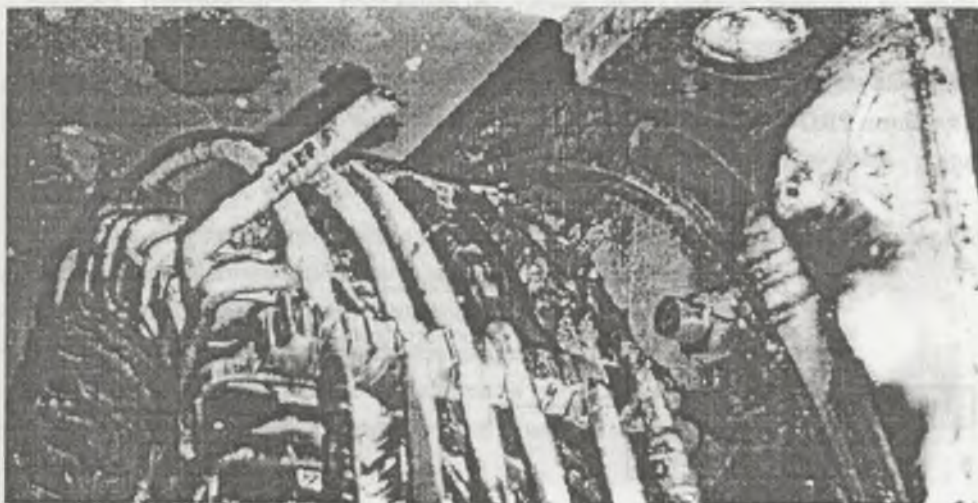
b)



Rys. 1.1. Typowe deformacje czoł cewek uzwojeń stojanów: a) odkształcenia obwodowe czoł cewek, b) wygięcia czoł cewek do osi wału wirnika

Fig. 1.1. Typical deformations of the stator winding fronts: a) peripheral deformation of the front coil, b) flexion of the front coils to the axle of motor shaft

W silnikach o mocy 3150 kW i  $2p = 2$  oraz 48 żłobkach w pakiecie stojana, występują częste upalenia wyprowadzeń zezwojów skrajnych cewek fazowych uzwojenia stojana w strefie ich połączenia (lutowania) z przewodem zasilającym danej fazy (rys. 1.2), wykonanym w kształcie obręczy z przewodu o przekroju kołowym. Upalenia te są często przyczyną poważnych awarii silnika, której usunięcie wymaga przezwojenia stojana.



Rys. 1.2. Upalenia w strefie połączenia zezwoju cewki fazowej z przewodem zasilającym w kształcie obręczy

Fig. 1.2. Burning off in connection zone of phase coils with ring shaped power lead

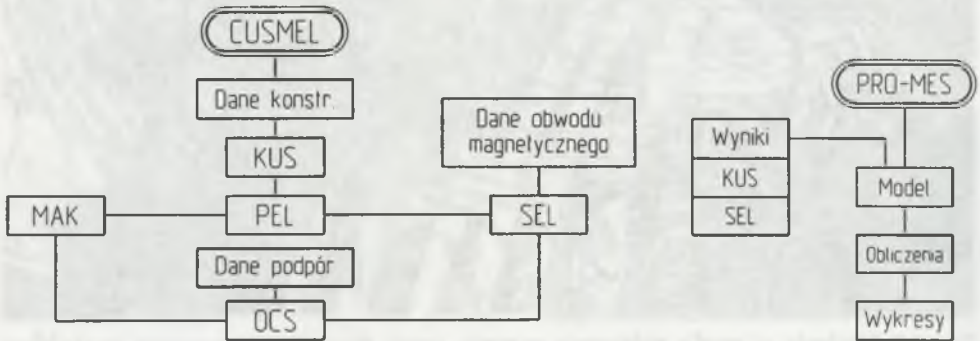
## 2. PROGRAMY KOMPUTEROWE CUSMEL I PRO-MES

Wieloletnie prace w dziedzinie zagadnień elektromechanicznych uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego doprowadziły do opracowania pakietu programów komputerowych "CUSMEL" (cewki uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych) [6]. W skład tego pakietu wchodzi pięć programów składowych (rys. 2.1):

1. Program **KUS** przeznaczony do projektowania kształtu czół cewek uzwojenia stojana (według metody podanej w [1]) oraz szablonów do ich kształtowania. Jest on przystosowany dla różnych rozwiązań cewek (symetryczne, niesymetryczne, równe długości półcewek dolnej i górnej warstwy uzwojenia stojana) oraz różnych wymagań dotyczących wysięgu osiowego i promieniowego czół uzwojenia stojana.
2. Program **PEL** służący do obliczeń i analizy podatności elektrodynamicznej czół uzwojenia stojana, odpowiadającej wartości siły elektrodynamicznej działającej na jednostkę długości czola cewki, przy jednostkowych prądach płynących w uzwojeniach silnika.

3. Program **SEL** przeznaczony do obliczeń i analizy sił elektrodynamicznych [2] działających na czoła uzwojenia stojana w stanach nieustalanej pracy silnika.
4. Program **MAK** obliczający macierze kształtu czoł uzwojenia stojana, wykorzystywane w obliczeniach odkształceń czoł wywołanych działaniem sił elektrodynamicznych.
5. Program **OSC** umożliwiający obliczenia i analizę odkształceń wybranego czoła uzwojenia stojana w różnych stanach nieustalonych pracy silnika.

W celu wyznaczenia naprężeń i odkształceń, równocześnie we wszystkich czołach uzwojenia stojana, wykorzystuje się współdziałanie (rys. 2.1) pakietu programów **CUSMEL** z systemem **PRO-MES** [7].



Rys. 2.1. Schemat programu CUSMEL i współdziałanie z programem PRO-MES

Fig. 2.1. Scheme of CUSMEL - programme and co - operation with PRO-MES programme

System **PRO-MES** jest to zintegrowany pakiet programów pozwalających na prowadzenie obliczeń i analiz wytrzymałościowych dowolnej konstrukcji metodą elementów skończonych. W systemie tym konstrukcja może być modelowana następującymi typami elementów skończonych:

- Pręty** - elementy przenoszące tylko siły osiowe,
- Belki** - elementy pryzmatyczne, przenoszące poza siłami osiowymi również siły tnące, momenty skręcające i gnące,
- O-S** - elementy modelujące osiową symetrię,
- P-O-S** - elementy modelujące płaski stan odkształcenia,
- Tarcze** - elementy modelujące płaski stan naprężenia,
- Płyty** - elementy modelujące płyty cienkie,
- Powłoki** - elementy łączące w sobie cechy tarcz i płyt,
- Bryły** - ośmiowęzłowe elementy przestrzenne.

Wyznaczony kształt czoł jednej cewki (program KUS), umożliwia zamodelowania czoł wszystkich cewek uzwojenia stojana w systemie PRO-MES 4.4. Model czoł uzwojenia stojana obciąża się siłami elektrodinamicznymi obliczonymi w programie SEL.

Usztywnienie modelu czoł uzwojenia stojana zależy od typu silnika i może być realizowane przy zastosowaniu:

- pierścieni usztywniających, podpartych na wspornikach przymocowanych do płyty prasującej pakiet stojana lub pierścieni wolno wiszących,
- wiązań między sąsiednimi czołami cewek z zastosowaniem przekładek dystansowych w dolnej i górnej warstwie uzwojenia stojana,
- dodatkowych pierścieni usztywniających składanych, umieszczonych między dolną i górną warstwą czoł.

Omówione programy umożliwiają wspomaganie komputerowe w rozwiązywaniu zagadnień elektromechanicznych czoł uzwojeń stojanów, a mianowicie w:

- projektowaniu kształtu czoł cewek uzwojenia stojana,
- technologii wykonania szablonów kształtujących czoła cewek uzwojenia stojana,
- analizie sił elektrodinamicznych działających na czoła uzwojenia stojana,
- doborze optymalnych miejsc usztywnień czoł uzwojenia stojana.

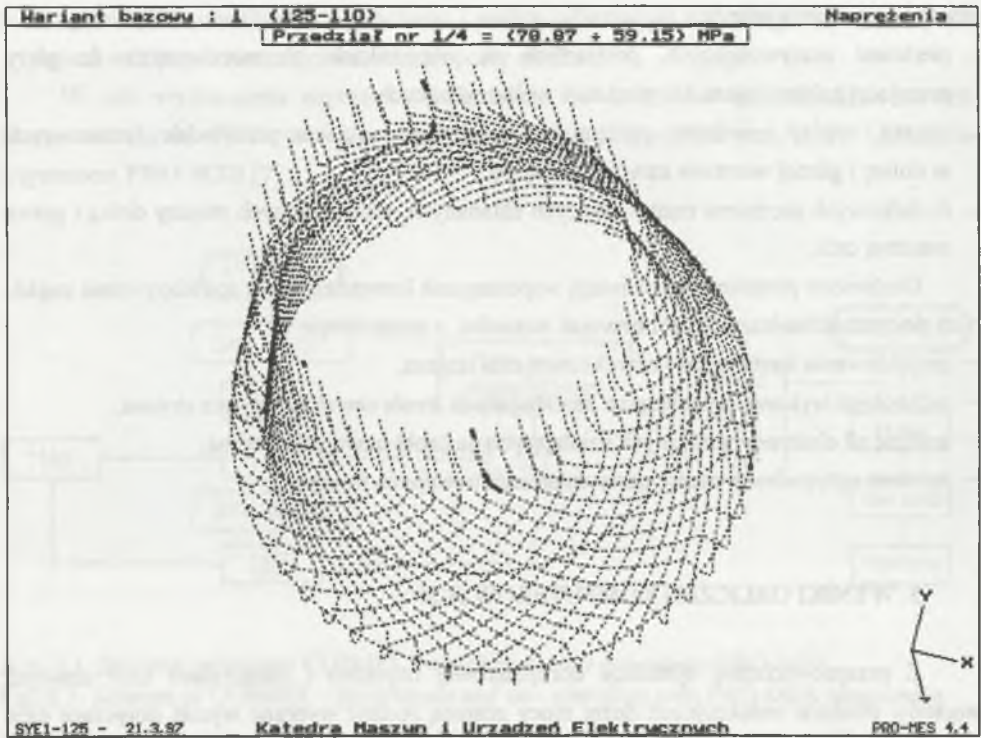
### 3. WYNIKI OBLICZEŃ KOMPUTEROWYCH

Z przeprowadzonej symulacji komputerowej naprężeń i odkształceń czoł uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy zostaną podane wybrane wyniki dotyczące czoł uzwojenia stojana silnika dwubiegunowego o mocy 3150 kW i 48 żłobkach w pakiecie stojana. Na taki wybór wpłynął fakt częstych awarii silników tego typu w eksploatacji napędów potrzeb własnych elektrowni blokowych.

Z obliczeń komputerowych naprężeń i odkształceń czoł uzwojenia stojana wynikają wnioski.

1. Największe wartości sił elektrodinamicznych, działających na czoła uzwojenia stojana, występują w chwili, gdy w dwóch fazach płyną prądy o takich samych wartościach bezwzględnych, a w trzeciej fazie prąd jest równy zero oraz gdy w dwóch fazach prądy mają wartości bezwzględne o połowę mniejsze od prądu w trzeciej fazie.
2. Największe naprężenia występują w skrajnych cewkach fazowych: przy wyjściu cewek ze żłobków stojana, na wykorbieniu czoł cewek przy przejściu z części żłobkowej w główny łuk stożkowy oraz w strefie główek cewek. Przedział o największych naprężeniach w czołach uzwojenia stojana został zaznaczony grubszymi liniami na rys. 3.1.

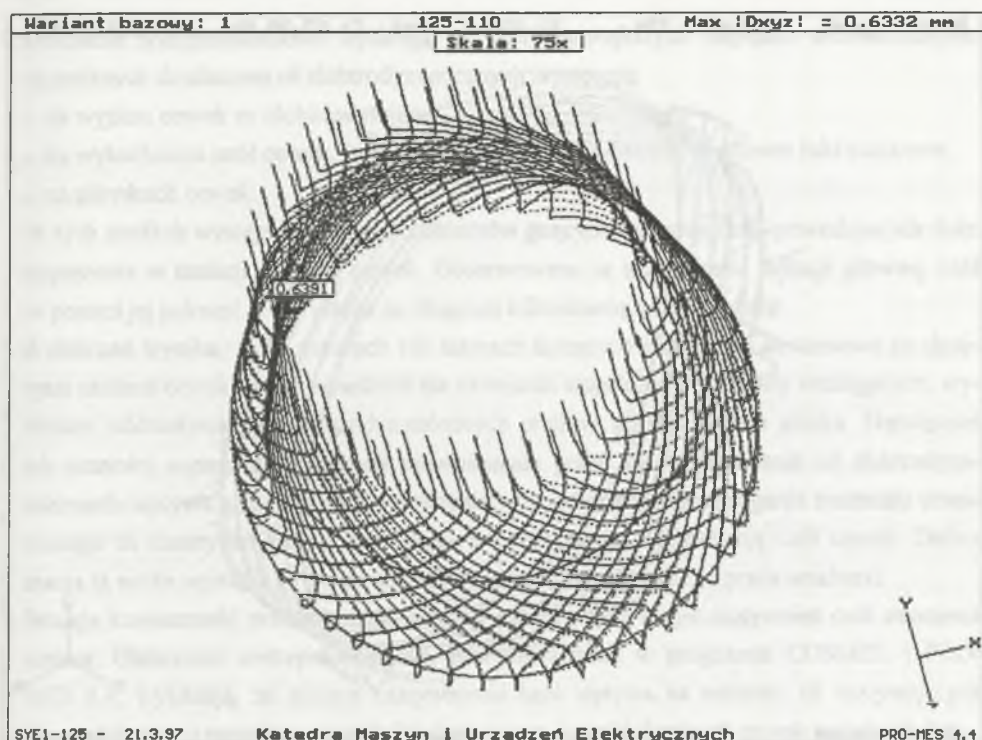
3. W sznurach lub taśmach, łączących przekładki dystansowe ze skrajnymi czółami cewek dwóch sąsiednich faz uzwojenia stojana, występują zawsze siły rozciągające, wywołane oddziaływaniem elektrodynamicznym prądów w uzwojeniach silnika.



Rys. 3.1. Strefa największych naprężeń w czółach uzwojenia stojana silnika o mocy 3150 kW i  $2p = 2$

Fig. 3.1. The largest stress zone in the fronts of stator winding of the motor of 3150 kW and  $2p = 2$

4. Siły elektrodynamiczne powodują drgania czół cewek uzwojenia stojana o składowej stałej skierowanej do środka poszczególnych grup fazowych. Drgania wymuszone czół uzwojenia mają częstotliwość równą podwójnej częstotliwości prądów w uzwojeniu silnika.
5. Czół cewek poszczególnych grup fazowych ulegają trwałym deformacjom w przypadku rozerwania wiązań między skrajnymi cewkami sąsiednich faz. Taką deformację uwidoczniło na rys. 3.2, która jest podobna do deformacji czół cewek tego silnika, przedstawionej na rys. 1.1a.



Rys. 3.2. Deformacje czoł cewek uzwojenia stojana silnika o mocy 3150 kW i  $2p = 2$

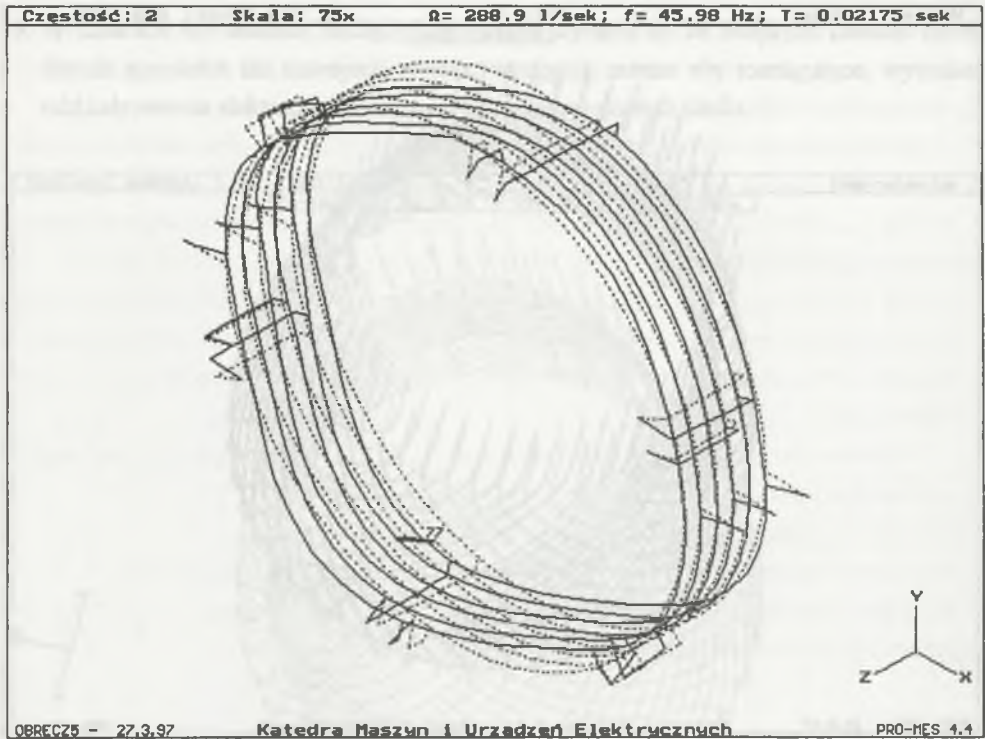
Fig. 3.2. Deformation of the front coils of the stator winding of the motor of 3150 kW and  $2p = 2$

Z uwagi na stosunkowo częstą przyczynę awarii silników dwubiegunowych o mocy 3150 kW, uwidoczoną na rys. 1.2, przeprowadzono obliczenia drgań własnych obrotów zasilających uzwojenia stojana. Obliczenia te przeprowadzono w programie PRO-MES 4.4.

Zamodelowano układ obrotów wraz z fragmentami przedłużeń zezwojów skrajnych cewek fazowych. Model sporządzono z belek o przekroju kołowym dla obrotów i przekrojach prostokątnych dla fragmentów przedłużeń zezwojów do obrotów oraz połączeń obrotów z tablicą zaciskową.

Rozpatrzono różnego rodzaju usztywnienia obrotów. W każdym przypadku jedna z pierwszych częstości drgań własnych była zbliżona do częstości drgań silnika wynikających z jego prędkości obrotowej. Przy sztywniejszym zamocowaniu obrotów do wsporników oraz przyjęciu sztywnego klinowania główek cewek po lutowaniu zezwojów dolnych i górnych półcewek (w przypadku wykonywania uzwojenia stojana z półcewek) piąta lub szósta częstość drgań własnych była zbliżona do 100 Hz, a więc częstości sił elektrodynamicznych działających na uzwojenia stojana.

Na rys. 3.3 przedstawiono charakter drgań własnych obrotów wraz z połączeniami przy częstości własnej 45,98 Hz.



Rys. 3.3. Drgania własne układu obręczy zasilających uzwojenia stojana o częstotliwości 45,98 Hz  
 Fig. 3.3. Free vibrations of the ring of a whed system supplying the stator windings at frequency 45,98 Hz

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione przykładowe skutki awarii silników potrzeb własnych elektrowni blokowych i elektrociepłowni oraz obserwacje uszkodzeń tej grupy silników w latach 1993 do 1996 i obliczenia komputerowe prowadzą do poniższych spostrzeżeń i wniosków.

1. W wyniku awarii podczas pracy tej grupy silników uszkodzeniom ulegają niemal zawsze uzwojenia stojana. Tylko w nielicznych przypadkach uszkodzenie uzwojenia stojana występuje przy zauważalnych pęknięciach lutów łączących pręty klatki wirnika z pierścieniami zwierającymi lub samych prętów, które mają wpływ na przyspieszone uszkodzenie uzwojenia stojana.
2. Obserwacje skutków awarii omawianej grupy silników wykazują, że najczęściej deformacje czoł występują w silnikach dwubiegunowych. Wynika to z tego, że czoła cewek tych silników są długie, a jednostkowe obciążenie siłami elektrodinamicznymi jest większe w porównaniu z silnikami 4- i więcejbiegunowymi.



3. Obliczenia wytrzymałościowe wykazują, że strefy największych naprężeń mechanicznych, wywołanych działaniem sił elektrodynamicznych występują:
  - na wyjściu cewek ze żłobków stojana,
  - na wykorbieniu czoł cewek, przy przejściu z części żłobkowej w główne łuki stożkowe,
  - na główkach cewek.W tych strefach występuje działanie momentów gnących i skręcających, powodujących duże naprężenia w izolacji głównej cewek. Obserwowane są uszkodzenia izolacji głównej czoł w postaci jej pęknięć i odprysków na długości kilkudziesięciu milimetrów.
4. Z obliczeń wynika, że w sznurach lub taśmach łączących przekładki dystansowe ze skrajnymi czołami cewek dwóch sąsiednich faz uzwojenia stojana występują siły rozciągające, wywołane oddziaływaniem elektrodynamicznych prądów w uzwojeniach silnika. Największe ich wartości występują w stanach nieustalonych pracy silnika. Działanie sił elektrodynamicznych wpływa z czasem na zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie materiału stosowanego na sznury lub taśmy, powodując ich rozerwanie i deformację czoł cewek. Deformacja ta może wystąpić w czasie normalnej pracy silnika (rozwój i praca ustalona).
5. Istnieje konieczność prawidłowego wyboru sposobu oraz miejsc usztywnień czoł uzwojenia stojana. Obliczenia wytrzymałościowe, przeprowadzone w programie CUSMEL i PROMES 4.4, wykazują, że miejsce usztywnienia czoł wpływa na wartości sił rozrywających sznury lub taśmy mocujące przekładki dystansowe do czoł skrajnych cewek sąsiednich faz.

## LITERATURA

1. Drak B.: Komputerowe wspomaganie kształtowania czoł uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. ZN Pol. Śl. Gliwice nr 1245, Elektryka z. 138, str. 185 - 198, 1994.
2. 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.
3. Drak B.: Stan obciążenia elektrodynamicznego czoł uzwojeń stojana maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego. ZN Pol. Śl. Gliwice, Mechanika z. 107, str 107-114, 1993.
4. Drak B.: Dobór miejsc usztywnień czoł uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy. Zesz. Probl. Maszyny Elektryczne nr 16, BORME Katowice, str. 9 - 18, 1993.
5. Drak B.: Analiza przyczyn awarii silników potrzeb własnych elektrowni blokowych. Zesz. Probl. Maszyny Elektryczne nr 50, BORME Katowice, str. 121 - 126, 1995.
6. Drak B., Paszek S.: Program CUSMEL. Prace n-b Kat. Masz. i Urz. Elektr. Pol. Śl. Gliwice 1991-1993.
7. Grajek K.: PRO-MES 4.4. Proj-Soft, Gliwice 1995.

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

Wpłynęło do Redakcji dnia 11 kwietnia 1997 r.

### Abstract

As a result of failure of high power induction motors which are used in block electric power station stators windings are mainly damaged. Exemplary deformations of stator winding fronts are shown in Fig. 1. Results of computer simulation of stress and deformation of the stator winding fronts which occur during motor failure are described in the paper. To calculate electrodynamic forces acting on the stator winding fronts CUSMEL - programme was used. The shape of a main arc conical front of the coil assumed to be the involute section of circle directly to the cone side [1]. Calculations of electrodynamic forces acting on the stator winding fronts were based on the method using Laplace equations and Biot - Savart's law which determines electrodynamic interaction between two leads conducting electric current [2]. Results of calculation obtained from CUSMEL - programme were used in PRO-MES - programme (based on the finite element method ) to build the model of stator winding fronts and to load the model which electrodynamic forces. Exemplary results of calculation of stresses and deformations of the stator winding fronts which occur in case of breaking fixation between the fronts of extreme coils in phase groups are, shown in Figs. 4.1 and 4.2. There are given conclusions from computer calculations and analysis of high power induction motors failures which was done in years 1993 - 1996.