

Zagadnienia elektromechaniczne uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy

Bronisław Drak

Uzwojenie stojana stanowi podstawowy zespół obwodu magnetycznego maszyny indukcyjnej. W silnikach indukcyjnych dużej mocy i w turbogeneratorach uzwojenia te są narażone na działanie sił elektrodynamicznych o dużych wartościach. Siły te (o podwójnej częstotliwości prądów stojana) wymuszają naprężenia mechaniczne oraz drgania uzwojenia w jego części żłobkowej, a szczególnie w czołach uzwojenia. Naprężenia i drgania decydująco przyspieszają zużycie izolacji zwojowej i głównej uzwojenia, które jest przyczyną zwarć zwojowych oraz zwarć do blach rdzenia stojana. Po analizie awarii ponad 300 silników indukcyjnych dużej mocy, pracujących w napędach potrzeb własnych bloków elektrowni zawodowych i elektrociepłowni, można stwierdzić, że ponad 80% awarii tych silników, spowodowanych uszkodzeniami uzwojeń stojanów, jest wynikiem wymienionych zwarć. W turbogeneratorach uszkodzenia uzwo-

jeń stojana występują znacznie rzadziej, głównie na wyjściu prętów uzwojenia ze żłobków rdzenia stojana, w strefie połączeń uzwojenia z wyprowadzeniami prądowymi oraz w strefie połączeń prądowych i wodnych na główkach prętów.

W produkcji oraz podczas remontów silników indukcyjnych dużej mocy, w tym głównie silników dwubiegunowych, występują trudności dokładnego ukształtowania zarysu czoł cewek uzwojenia stojana. Z tego powodu w silnikach dwubiegunowych wysokonapięciowych odległości między bokami czoł cewek nie są równe na długości ich głównych łuków stożkowych. Często boki czoł cewek przylegają do siebie w początkowej strefie ich łuków stożkowych, mimo dużej odległości między nimi w pobliżu główek cewek. Ma to niekorzystny wpływ na żywotność uzwojenia ze względu na pogorszenie warunków chłodzenia oraz możliwość przebicia izolacji między czołami cewek sąsiednich faz. W przypadku przylegania do siebie

czoł sąsiednich cewek występuje przecieranie ich izolacji głównej spowodowane drganiami czoł wymuszonymi siłami elektrodynamicznymi.

Kształt czoł uzwojenia stojana

Czoła dwuwarstwowych uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy (rys. 1) są rozłożone na dwóch powierzchniach stożko-

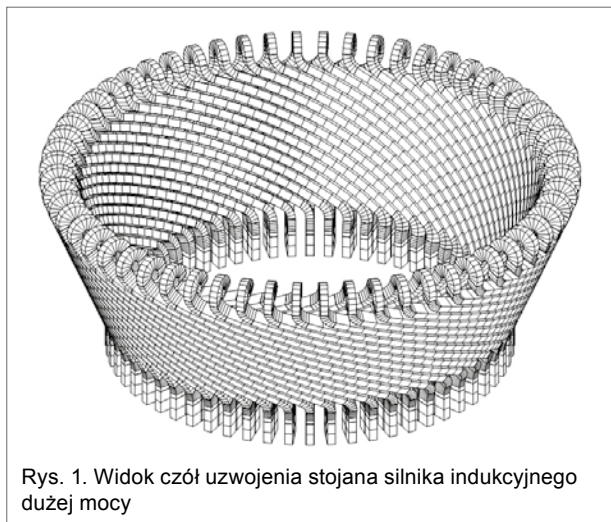
Streszczenie: Artykuł obejmuje problematykę mechaniczną i elektrodynamiczną uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy. Zaprezentowano metodę projektowania kształtu czoł cewek silników indukcyjnych dużej mocy z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego w programie KUS. Podano przykłady wykorzystania obliczeń komputerowych w produkcji szablonów kształtujących czoła cewek uzwojeń stojanów. Podano zasadę obliczeń sił elektrodynamicznych działających na przestrzenny układ czoł uzwojeń silników dużej mocy i turbogeneratorów. Zaprezentowano przebiegi tych sił w stanach nieustalonych. Przeprowadzono analizę wybranych awarii uzwojeń stojanów silników i turbogeneratorów.

🇬🇧 ELECTROMECHANICS PROBLEMS OF STATORS WINDINGS HIGH POWER INDUCTIVE MACHINES

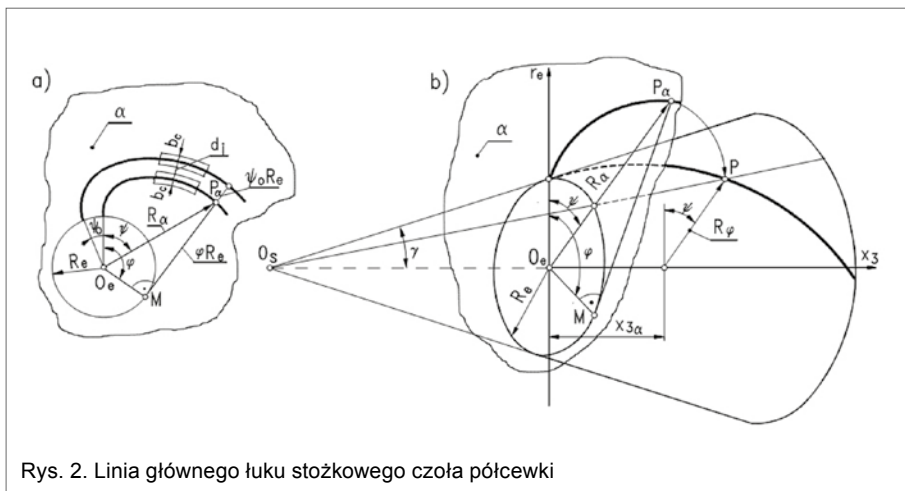
Abstract: The paper presents mechanical and electrodynamic problems of stator windings high power inductive machines. Methodics of windings shape designing high power inductive machines using computer modelling (KUS) are shown. Examples of computer simulation application in production of shaping patterns of stator windings high power inductive machines are presented. Rules of calculations electrodynamic forces acting on the spacial system of stators windings high power inductive machines and turbogenerators are shown. The analysis of choosen failures of stators windings high power inductive machines and turbogenerators was made.

wych. Na jednej z nich są rozłożone czoła górnej, a na drugiej – czoła dolnej warstwy uzwojenia stojana, której cewki leżą na dnie żłobków rdzenia stojana.

Dokładne ukształtowanie czoł cewek – ważne szczególnie dla uzwojeń stojanów maszyn dwubiegunowych ze względu na ich długość i duży poskok uzwojenia – jest możliwe jedynie przy analitycznym wyznaczaniu zarysu czoł oraz zarysów szablonów, na których kształtują się czoła cewek. Stosowane dotychczas metody analityczno-wykresłne [1] umożliwiają wyznaczenie zarysu stożkowych łuków



Rys. 1. Widok czoł uzwojenia stojana silnika indukcyjnego dużej mocy



Rys. 2. Linia głównego łuku stożkowego czoła półcewki

czoła cewki na płaskim rozwinięciu pobocznicy stożka, na której ma leżeć linia średnia czoła cewki przechodząca przez środki jego przekrojów poprzecznych.

Przedstawiona na rys. 2 analityczna metoda wyznaczania przestrzennego kształtu czół cewek uzwojenia stojana – sprawdzona w warunkach przemysłowych – spełnia warunek dotyczący równej odległości między bokami głównych łuków stożkowych czół cewek i jest dostosowana do komputerowego wspomaganie przy projektowaniu kształtu cewek oraz szablonów kształtujących ich czoła.

Linia średnia czoła cewki uzwojenia stojana

Linia średnia czoła półcewki uzwojenia stojana przechodząca przez środki jego przekrojów poprzecznych jest linią ciągłą. Sposób jej konstrukcji oraz pełny zapis analityczny został przedstawiony w [3].

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).

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 czoła półcewki.

Program KUS do projektowania czół cewek uzwojenia stojana

Zapis analityczny pełnego zarysu czoła cewki umożliwił opracowanie programu komputerowego KUS [3] przeznaczonego do projektowania czół uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy. Program ten umożliwi projektowanie kształtu cewek w trzech wariantach:

- **Wariant A** – projektowanie kształtu czół cewek symetrycznych o równych rozwarciach kątowych;
- **Wariant B** – projektowanie kształtu czół cewek o równych długościach ich półcewek;
- **Wariant C** – projektowanie kształtu czół cewek o równych odległościach między bokami czół głównych łuków stożkowych półcewek dolnej i górnej warstwy uzwojenia.

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

- **Wersja 1** – projektowanie kształtu czół cewek przy zadanym wysięgu promieniowym i osiowym, przy czym kąt nachylenia tworzącej stożka dolnej warstwy $\gamma_d = \text{var}$;
- **Wersja 2** – projektowanie kształtu czół cewek przy zadanym wysięgu osiowym oraz wymaganej odległości między bokami górnej warstwy czół;
- **Wersja 3** – projektowanie kształtu czół cewek przy zadanym wysięgu promieniowym oraz wymaganej odległości między bokami górnej warstwy czół;
- **Wersja 4** – projektowanie kształtu czół cewek przy zadanym wysięgu promieniowym i osiowym, przy czym kąt nachylenia tworzącej stożka dolnej warstwy czół jest wyznaczony wymiarami i położeniem pierścieni usztywniających.



Rys. 3. Szablon do ręcznego kształtowania czół cewek stojana SCF-355-M2 o mocy 400 kW



Rys. 4. Szablony kształtujące czoła cewek silnika typu SCDm 102r o mocy 200 kW na rozciągarkę firmy Maxei

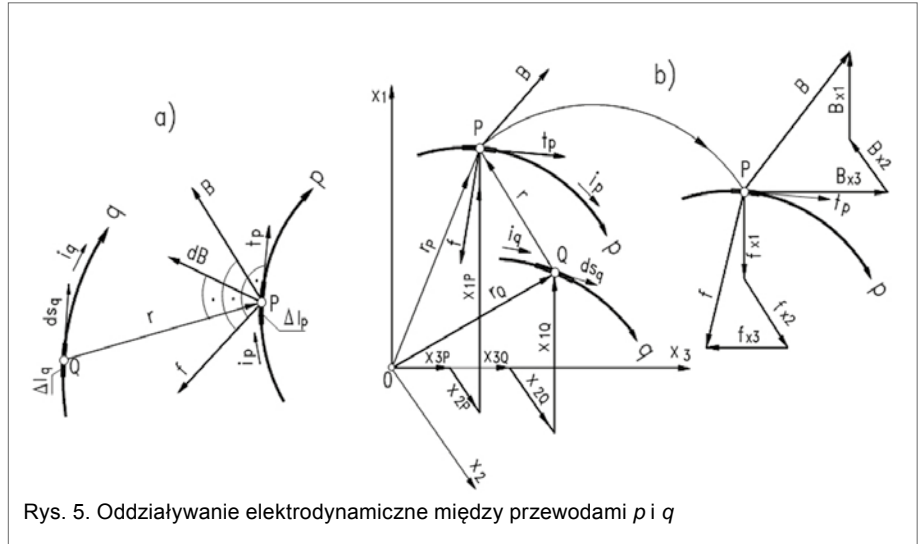
Szablony do kształtowania czół cewek

Wyniki obliczeń komputerowych w programie KUS umożliwiają wykonanie szablonów do kształtowania czół cewek na specjalnie skonstruowanych i wykonanych urządzeniach obróbkowych.

Kształtowanie czół cewek uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy wykonuje się w kraju najczęściej ręcznie. Na rys. 3 przedstawiono szablon do ręcznego kształtowania czół cewek silnika wysokonapięciowego typu SCF-355-M2 o mocy 400 kW. Szablon ten wykonano przy jednym zamocowaniu półfabrykatu na urządzeniu obróbkowym [4], przy wykorzystaniu wyników obliczeń komputerowych w programie KUS.

Przy maszynowym kształtowaniu czół cewek silników dwubiegunowych na rozciągarkach firmy Maxei stosuje się segmenty szablonów kształtujących główne łuki stożkowe czoła cewki. Szablony kształtujące czoła cewek silnika typu SCDm 102r o mocy 200 kW uwidocznił na rys. 4.

Zapis analityczny kształtu czół cewek uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy oraz opracowany pro-



Rys. 5. Oddziaływanie elektrodynamiczne między przewodami p i q

gram KUS został z powodzeniem przetestowany w zakładach produkcyjnych i remontowych tych silników w zakresie mocy od 160 do 6300 kW.

Siły elektrodynamiczne działające na czoła uzwojenia stojana

Siły elektrodynamiczne działające na czoła uzwojenia stojana są funkcją prądów w uzwojeniach stojana i wirnika, kształtu czół uzwojeń oraz elektrodynamicznych oddziaływań rdzenia stojana, rdzenia wirnika i korpusu maszyny.

W obliczeniach sił elektrodynamicznych przyjmuje się przestrzenny kształt czół cewek wyznaczony przez środki ich przekrojów poprzecznych. Pomija się wpływ dynamicznej zmiany odległości między bokami czół cewek (w wyniku ugięć czół wywołanych działaniem sił elektrodynamicznych) na zmiany wartości indukcji magnetycznej w przestrzeni czół uzwojenia maszyny prądu prądu.

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 układzie współrzędnych prostokątnych [3].

Elementarny wektor indukcji magnetycznej dB w punkcie P przewodu p (rys. 5 a), wywołanej prądem i_q w wycinku Δl_q przewodu q , jest prostopadły do płaszczyzny utworzonej przez ten punkt oraz wektor ds_q , styczny do przewodu q w punkcie Q .

Wypadkowy wektor indukcji magnetycznej B w punkcie P – wywołanej prądem i_q płynącym w przewodzie q o długości l_q — wyznacza zależność

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_q} \frac{[ds_q \times r]}{|r|^3} i_q$$

w której:

- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni;
- ds_q – wektor elementarny, styczny do przewodu q w punkcie Q ;
- r – wektor od punktu Q do punktu P ;
- i_q – prąd w przewodzie q zgodny ze zwrotem wektora ds_q .

Wektor liniowej gęstości siły elektrodynamicznej f w punkcie P elementarnego wycinka Δl_p przewodu p , wywołanej oddziaływaniem prądu i_p tego przewodu i indukcji magnetycznej B w tym punkcie, wytworzonej przez prąd i_q , jest równy:

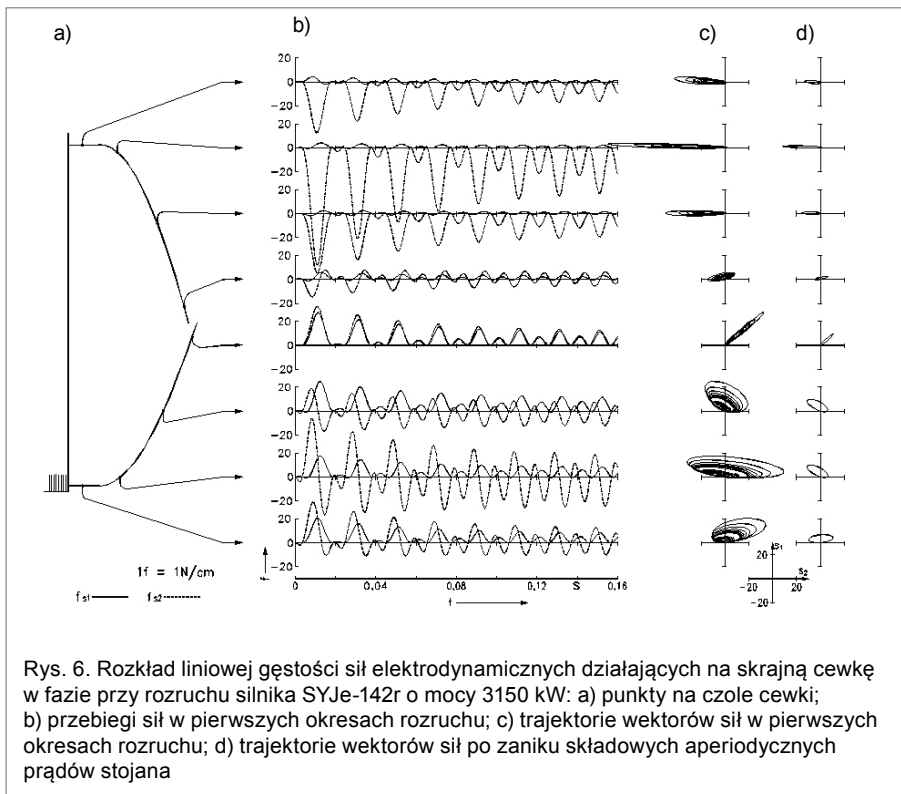
$$f = i_p [t_p \times B]$$

gdzie:

- t_p – wektor jednostkowy, styczny do przewodu p w punkcie P ;
- i_p – prąd w przewodzie p zgodny ze zwrotem wektora t_p .

Algorytmy obliczeń sił elektrodynamicznych działających na czoła uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy oraz turbogeneratorów zostały podane w [3]. Na rys. 6 zaprezentowano przebiegi liniowej gęstości sił elektrodynamicznych w czasie rozruchu silnika typu SYJe-142r o mocy 3150 kW.

Rozkład przestrzenny czół prętów uzwojenia stojana turbogeneratorsa jest



podobny do dwubiegunowych silników indukcyjnych o uzwojeniu dwuwarstwowym. To powoduje, że rozkłady sił elektrodynamicznych od prądów stojana są również podobne. W turbogeneratorach należy uwzględnić wpływ prądów wzbudzenia na wartości sił elektrodynamicznych działających na czoła prętów uzwojenia stojana, który wynosi ok. 20% sumarycznych wartości sił. Na rys. 7 podano przebiegi sił elektrodynamicznych od prądów wzbudzenia turbogeneratora.

Z wykresów podanych na rys. 6 i 7 wynika, że wektory sił elektrodynamicznych mają kierunki zmienne. Końce wektorów tych sił zakreślają krzywe zbliżone do elips, szczególnie w pierwszych okresach stanu nieustalonego. W pierwszym okresie stanu nieustalonego, przy dużych wartościach składowych aperiodycznych prądów, częstotliwość sił elektrodynamicznych jest równa częstotliwości prądów, a po zaniku tych składowych częstotliwość sił jest podwójną częstotliwości prądów.

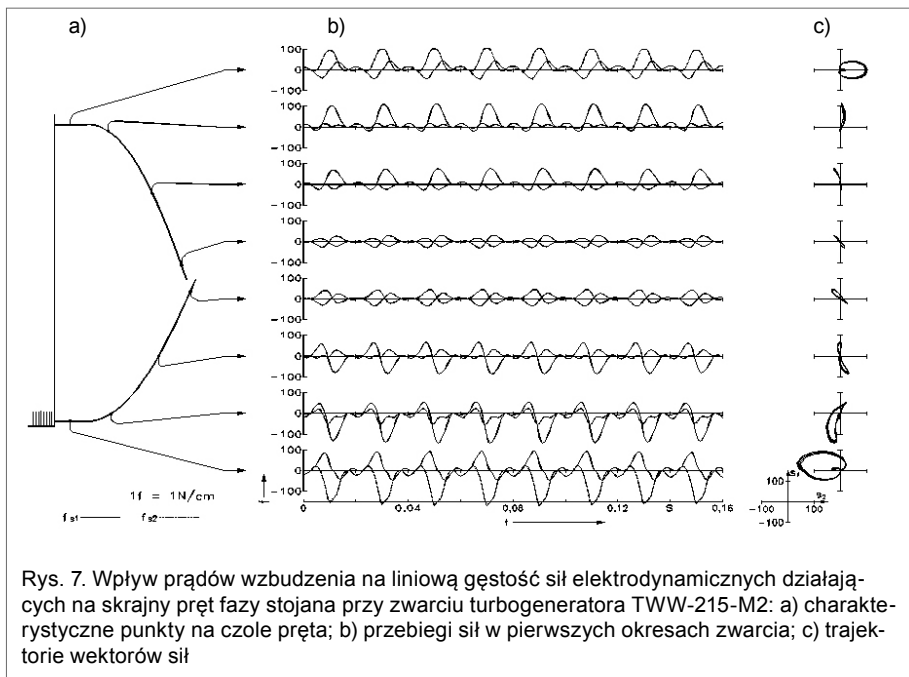
Skutki działania sił elektrodynamicznych

Siły elektrodynamiczne wymuszają drgania uzwojenia stojana, szczególnie w strefach czołowych uzwojenia. Amplitudy drgań zależą od wartości sił wymuszających, miejsca na czołach uzwojenia oraz sposobu usztywnień czoł uzwojenia stojana. Na rys. 8 podano oscylogramy drgań czoł uzwojenia stojana silnika SYJd-132t o mocy 1600 kW. Na rys. 8a jest oscylogram amplitudy drgań czoł uzwojenia, których czoła cewek były usztywnione przekładkami dystansowymi oraz pierścieniami wykonanymi ze stali niemagnetycznej. Widoczny jest wpływ drgań własnych pierścieni usztywniających na przebieg drgań czoł cewek. Zmiany usztywnienia, polegające na zastosowaniu pierścieni usztywniających wykonanych z tworzywa sztucznego uwidoczniły wpływ tłumiącego oddziaływania tych pierścieni w pierwszych okresach rozruchu silnika (rys. 8b).

Uszkodzenia awaryjne uzwojeń stojanów silników indukcyjnych dużej mocy

W uzwojeniach stojanów silników można wyróżnić kilka charakterystycznych stref, w których występują źródła awarii tych silników. Należą do nich: środkowa strefa żłobkowa rdzenia stojana, wyjście cewek ze żłobków rdzenia stojana, czoła cewek uzwojenia stojana. Oto kilka przykładów [5].

1. Często przyczyną awarii silnika jest zwarcie zwojowe w cewce lub zwarcie do rdzenia stojana w środkowej części długo-

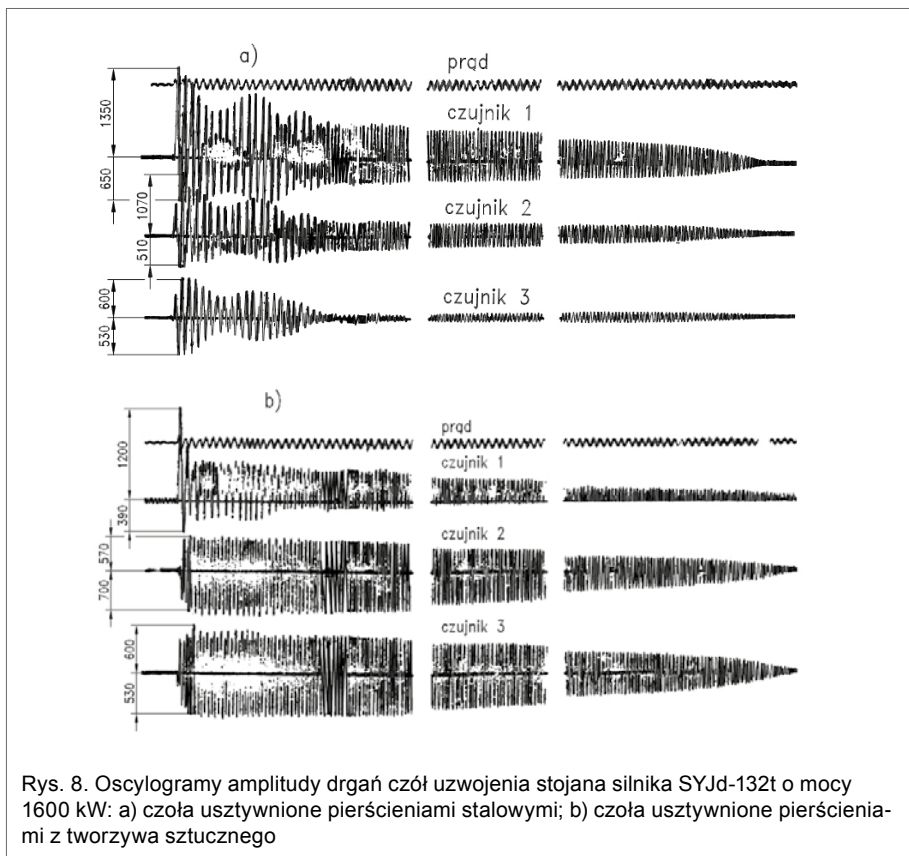


Rys. 11. Widok cewki, w której wystąpiło zwarcie zwojowe w środkowej strefie długości rdzenia stojana

ne siłami elektrodynamicznymi. To powoduje powstanie luzów promieniowych w klinowaniu cewek w żłobkach umożliwiającym drgania cewek, a przez to stopniowe wycieranie izolacji cewek, które prowadzi do przebicia izolacji i zwarć do rdzenia stojana. Zewnętrznym objawem takiego zwarcia może być miejscowe wypalenie klinów żłobkowych (rys. 9).

Uszkodzenie izolacji głównej cewki powoduje jej przebicie i powstanie łuku elektrycznego między zezwojami cewki i blachami rdzenia. Łuk miejscowo topi zezwoje miedzi, a krople miedzi osadzają się na dnie i bokach żłobka rdzenia stojana (rys. 10).

Bardzo rzadko spotyka się wytopienia zezwojów cewki uwidocznione na rys. 11, z których tylko zezwój (dwa przewody równoległe) w połowie wysokości cewki nie jest przetopiony. Źródłem tego są



ści rdzenia. Przyczyną takich zwarć jest uszkodzenie izolacji zwojowej lub głównej cewki, na które mają wpływ warunki termiczne w środkowej części rdzenia stojana oraz działanie sił elektrodynamicznych na cewki w części żłobkowej. Siły te są tętniące pełne skierowane do dna żłobka, gdy w żłobku są ułożone cewki tej samej fazy uzwojenia, a w przypadku gdy w żłobku są cewki dwóch różnych

faz, siły elektrodynamiczne mają składowe skierowane do dna żłobka oraz do klinów żłobkowych [2].

Mimo klinowania cewek w żłobkach, po pewnym okresie eksploatacji silnika następuje starzenie izolacji, wgniatawanie blach rdzenia w kliny żłobkowe oraz w podkładki izolacyjne na dnie żłobka lub bezpośrednio w izolację główną dolnej warstwy cewek, co jest spowodowa-



Rys. 12. Skutki zwarcia na wyjściu cewki ze żłobka rdzenia stojana



Rys. 14. Deformacja czoł po krótkotrwałym zwarceniu



Rys. 16. Skutki zwarcia w główce cewki



Rys. 13. Zwarcie między cewkami fazowymi w strefie wykorbienia czoł cewek



Rys. 15. Deformacja czoł po długotrwałym zwarceniu



Rys. 17. Zniszczenia cewek w strefie ich główek

zwarcia wewnętrzne między zezwojami cewki spowodowane uszkodzeniem izolacji zwojowej.

2. Wyjście cewek ze żłobków rdzenia stojana jest strefą, w której często występuje źródło awarii silnika. Analiza sił elektrodynamicznych wykazuje, że w tej strefie występują ich składowe wzdłuż osi podłużnej żłobka oraz siły te wywołują momenty zginające w obu płaszczyznach sztywności cewki. W konsekwencji w izolacji i miedzi zwojowej powstają naprężenia ściskające i rozciągające przyspieszające niszczenie izolacji głównej i zwojowej. Dodatkowym czynnikiem jest wgniatanie skrajnych blach rdzenia w izolację główną cewek. Uszkodzenie izolacji zwojowej lub głównej jest przyczyną zwarcia między zezwojami cewki oraz do blach rdzenia stojana. Jeden ze skutków takiego zwarcia uwidoczniono na rys. 12. W czasie takiego zwarcia występuje bardzo często miejscowe wytopienie blach rdzenia stojana.

3. Nieprawidłowo zaprojektowanie i ukształtowanie czoł cewek sprawia, że w strefie ich wykorbienia przy przejściu z prostoliniowych wsięgow żłobkowych w główne łuki stożkowe czoł, sąsiednie czoła przylegają do siebie w tej strefie. Wzajemne wycieranie izolacji głównej czoł spowodowane ich drganiami wymuszonymi siłami elektrodynamicznymi

proceedzi w konsekwencji do zwarcia w tej strefie między sąsiednimi czołami. Skutki takiego zwarcia uwidoczniono na rys. 13.

4. Niemal zawsze w przypadku wystąpienia zwarć zwojowych lub zwarć do rdzenia stojana występuje deformacja czoł uzwojenia. Największym deformacjom ulegają czoła skrajnych cewek w poszczególnych grupach fazowych. Występuje zerwanie wiązań usztywniających cewki do przekładek dystansowych, ponieważ siły elektrodynamiczne zawsze chcą rozerwać te wiązania. Z zasady większe deformacje czoł cewek występują w górnej (wewnętrznej) warstwie uzwojenia stojana. Przy krótkotrwałym zwarceniu (szybkie wyłączenie zasilania silnika) występuje rozerwanie wiązań między czołami skrajnych cewek w grupach fazowych (rys. 14). Znacząco większe deformacje występują po długotrwałym zwarceniu (rys. 15).

5. Kolejną strefą występowania źródeł zwarć zwojowych są główki cewek. Siły elektrodynamiczne wywołują w głów-

kach cewek momenty skręcające i zginające. Naprężenia nimi wywołane powodują stopniowe rozwarstwienie izolacji zwojowej i głównej. W rezultacie występują zwarcia mogące wytopić miejscowo wszystkie zezwoje cewki (rys. 16) lub całkowicie zniszczyć strefę główek cewek (rys. 17).

6. W silnikach indukcyjnych o mocach do 850 kW połączenia prądowe międzygrupowe i międzyfazowe są wykonywane z przewodów zwojowych cewek, które są układane równolegle i usztywniane taśmami do połączeń międzycewkowych (rys. 18). To powoduje, że w wyniku drgań następuje przecieranie izolacji połączeń prądowych i międzycewkowych, prowadzące do zwarć i miejscowego wytopienia łukiem elektrycznym tych połączeń (rys. 18).

7. Nieprawidłowo wykonane mocowania czoł cewek do pierścieni usztywniających może doprowadzić do powstania dużego luzu między czołami dolnej warstwy uzwojenia i pierścieniem usztywniającym (rys. 19). Nieprawidłowo-

reklama



Rys. 18. Skutki zwarcia w strefie połączeń prądowych



Rys. 19. Widok poluzowanych usztywnień czoł cewek do pierścienia usztywniającego

we usztywnienie czoł w tej strefie często prowadzi do przetarcia izolacji głównej oraz izolacji pierścienia usztywniającego, a w konsekwencji występuje zwarcie uzwojenia stojana do pierścienia, metalicznie połączonego do korpusu silnika poprzez wsporniki pierścienia.

8. Istnieje jeszcze wiele przyczyn uszkodzeń uzwojeń stojanów, których wystąpienie prowadzi do awarii silnika. Należą do nich m.in.:

- obrót rdzenia stojana (o kilka stopni) względem korpusu silnika z powodu nieprawidłowego zabezpieczenia rdzenia przed takim obrotem;
- wytopienie łukiem elektrycznym połączenia tablicy zasilającej silnika z uzwojeniem stojana z powodu nieprawidłowo wykonanego tego połączenia;
- przeprowadzanie prób napięciowych izolacji uzwojenia stojana podczas każdego przeglądu głównych silnika, które zawsze prowadzi do pogorszenia stanu izolacji uzwojenia.

Wybrane uszkodzenia uzwojeń stojanów turbogeneratorów

Turbogenerator jest najważniejszym ogniwem w bloku energetycznym, dlatego wymagania stawiane technologii ich produkcji, bieżącym badaniom eksploatacyjnym i obsłudze technicznej są bardzo wysokie. Mimo tego w cza-

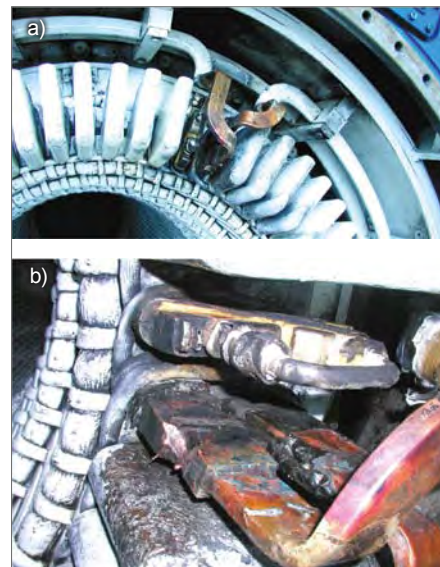


Rys. 20. Zwarcie łukowe pręta z rdzeniem stojana: a) lokalizacja zwarcia, b) wytopienie blach rdzenia stojana, c) uszkodzenia izolacji pręta

sie eksploatacji występują uszkodzenia uzwojeń stojanów spowodowane prądami w uzwojeniach stojana i wirnika. Można wymienić dwie charakterystyczne strefy takich uszkodzeń.

Pierwszą jest strefa wyjścia prętów uzwojenia ze żłobków rdzenia stojana, w której następuje stopniowe uszkadzanie izolacji głównej prętów z przyczyn podobnych jak w silnikach oraz dodatkowo nagrzewania skrajnych blach rdzenia stojana. Początkowo występują wyładowania niepełne między miedzią pręta i rdzeniem, a następnie występują zwarcia łukowe (rys. 20).

Drugą strefą są wyprowadzenia prądowe uzwojenia stojana, szczególnie w tych rozwiązaniach konstrukcyjnych, w których wyprowadzenie te (tzw. korona) są usztywniane bezpośrednio do korpusu stojana. Przy tym sposobie usztywnienia, oprócz drgań wymuszanych siłami elektrodynamicznymi, występują także duże naprężenia mechaniczne na łukach przejścia wyprowadzenia (rys. 21 a) spowodowane wydłużeniami termicznymi uzwojenia stojana. Zmienne naprężenia w rurkach wyprowadzeń prądowych są przyczyną ich pęknięć i wycieku do wnętrza turbogeneratorskiego destylatu chłodzącego uzwojenia stojana. Znacznie gorsze w skutkach jest uszkodzenie izolacji bezpośrednio przy połączeniu wyprowadzeń



Rys. 21. Zwarcie międzyfazowe między wyprowadzeniami prądowymi uzwojenia stojana: a) lokalizacja zwarcia; b) skutki zwarcia

z półprętami. Występuje wówczas łukowe zwarcie międzyfazowe, a jego skutki zaprezentowano na rys. 21 b.

Literatura

- [1] ALEKSIEJEW A. E.: *Konstrukcja elektrycznych maszyn*. Gosenergoizdat, Moskwa 1958.
- [2] DĄBROWSKI M.: *Konstrukcja maszyn elektrycznych*. PWT, Warszawa 1977.
- [3] DRAK B.: *Zagadnienia elektromechaniczne czoł uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego*. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. zeszyt 1401, Gliwice 1998.
- [4] DRAK B.: *Urządzenie do frezowania szablonów kształtujących czoła cewek uzwojeń stojanów maszyn indukcyjnych dużej mocy*. Urz. Pat. R. P. Patent nr 284446, 1993.
- [5] DRAK B.: *Ekspertyzy awarii silników indukcyjnych dużej mocy i turbogeneratorów*. 1994 do 2009.

Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki nr 6025/B/T02/2011/40.

dr hab. inż. Bronisław Drak, prof. Pol. Śl. – Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie Instytutu Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, tel./fax 32-237 14 47; e-mail: bronislaw.drak@polsl.pl