

William Oh

ITW Company, Morgan Carbon Polska Sp. z o.o., Warszawa

ZAPOBIEGANIE ELEKTROEROZYJNYM USZKODZENIOM ŁOŻYSK W SILNIKACH PRĄDU PRZEMIENNEGO ZASILANYCH Z FALOWNIKÓW

PREVENTING VFD/AC DRIVE INDUCED ELECTRICAL DAMAGE TO AC MOTOR BEARINGS

Abstract: The use of variable-frequency drives (VFDs) to control AC motors has increased dramatically in recent years. In addition to their low operating cost and high performance, they save energy. Today, the challenge facing system designers and engineers is to minimize damage to AC motors from shaft current. From its first minute of operation, a VFD induces destructive voltages that build up on the motor shaft until they find discharge paths to the frame (ground). In most cases, the motor bearings present the path of least resistance. Once voltage is sufficient to overcome the resistance of the oil film layer in the bearing, shaft current discharges, causing electrical discharge machining (EDM) pits and fusion craters in the race wall and ball bearings. This phenomenon continues until the bearings become so severely pitted that fluting, excessive noise, and failure occur. Mitigation of this damage is possible through various strategies. Some are narrow in application, and most are costly. Many are not technically feasible. However, a new technology employs a circumferential ring of conductive micro fibers to discharge harmful currents and provide a low-cost solution to the problem.

1. Wstęp

W ostatnich latach znacznie wzrosła liczba przemienników częstotliwości stosowanych do regulacji prędkości silników prądu przemiennego. Przy niskich kosztach eksploatacyjnych mają one lepsze osiągi i pozwalają na oszczędności w zużyciu energii elektrycznej. Najnowszym wyzwaniem z jakim muszą się zmierzyć projektanci i inżynierowie, jest zminimalizowanie uszkodzeń silników prądu przemiennego wskutek prądów łożyskowych. Od momentu włączenia napędy falownikowe indukują na wale wirnika maszyny niebezpieczne napięcie, którego wielkość powoduje powstawanie wyładowań elektrycznych do obudowy silnika (uziemia). W większości przypadków to łożyska silnika stanowią niskorezystancyjną ścieżkę przewodzącą. Jeśli wielkość napięcia przekroczy wytrzymałość napięciową izolacyjnej warstewki smaru (filmu olejowego) w łożyskach, następuje wyładowanie elektryczne, powodujące powstawanie wżerów i kraterów elektroerozyjnych na ściankach bieżni i elementach tocznych łożysk. Zjawisko to trwa aż do momentu, kiedy stopień degradacji łożysk jest tak poważny, że powoduje drgania i nadmierny hałas, a w końcu następuje awaria.

Istnieją różne sposoby ograniczania tych uszkodzeń. Niektóre z nich mają ograniczony zakres zastosowania, a ich koszty są znaczne. Inne są niewykonalne pod względem technicznym. Nowa technologia, wykorzystująca pierścień z obwodowo rozmieszczonymi przewodzącymi mikrowłóknami do odprowadzania szkodliwych prądów, stanowi skuteczne rozwiązanie problemu.

2. Napędy o regulowanej prędkości powodują powstawanie prądów łożyskowych w silnikach prądu przemiennego

W dużej części względy ochrony środowiska naturalnego sprawiły, że w ostatnich latach obserwuje się duży wzrost liczby napędów falownikowych z modulacją szerokości impulsów (PWM) do regulacji prędkości silników prądu przemiennego. Obok niewątpliwych zalet, takich jak niskie koszty eksploatacji i wysoka sprawność, pojawiają się też problemy. Prądy łożyskowe wywoływane przez napęd falownikowy mogą prowadzić do awarii silnika. Jeśli nie zastosuje się jakiejś formy ograniczenia ich wpływu, prądy łożyskowe wywołają wżery i kratery elektroerozyjne powodujące drgania i nadmierny hałas i w końcu awarię łożyska, a w następstwie awarię silnika.

O skali problemu świadczą poniższe dane:

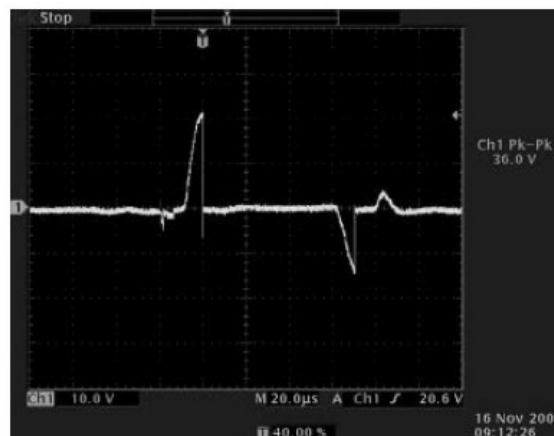
- Konstrukcja nowoczesnych łożysk silnikowych pozwala na ich eksploatację przez ponad 100 tys. motogodzin, podczas kiedy w napędzie falownikowym mogą ulec awarii już po ok. miesiącu pracy (720 godz.).
- Jeden z dostawców systemów klimatyzacyjno-wentylacyjnych zgłosił ostatnio, że z zainstalowanych w dużym budynku 30 szt. 45kW wentylatorów osiowych z napędem falownikowym 2 uległy awarii po 6 miesiącach, a wszystkie napędy uszkodziły się w przeciągu 1 roku.
- Kilku dużych producentów papieru ankietowanych w tej sprawie odpowiedziało, że awarie napędów falownikowych z powodu uszkodzeń łożysk silników występowały w ich zakładach średnio co pół roku.
- Największy producent silników elektrycznych w USA za swoje najważniejsze wyzwanie techniczne uważa wyeliminowanie uszkodzeń silników, wynikających z powodu stosowania falowników.
- Istnieje i działa niemal tuzin blogów Internetowych, których tematem są problemy prądów łożyskowych występujące w napędach falownikowych, a uczestnicy wymieniają informacje i doświadczenia oraz proponują rozwiązania.
- Rokrocznie tylko w USA awarie wywołane przez prądy łożyskowe pochodzące od napędów falownikowych, powodują setki tysięcy godzin nieplanowanych przestojów. W dodatku awarie te wpływają na wydajność i niezawodność maszyn i linii produkcyjnych, w których zastosowano takie napędy.
- Po ostatnim wzroście cen silników elektrycznych (ok. 16% w ciągu zeszłego roku), spowodowanym wzrostem cen miedzi, problem ten będzie stawał się coraz bardziej kosztowny.

3. Elektroerozyjne uszkodzenia łożysk

Z powodu wysokich częstotliwości komutacji, stosowanych w inwerterach z modulacją szerokości impulsów (PWM), każdy napęd falownikowy powoduje powstawanie prądów łożyskowych w dołączonym do niego silniku prądu przemiennego. Częstotliwość komutacji tranzystorów IGBT używanych w takich falownikach powoduje na drodze indukcji elektromagnetycznej powstawanie napięcia na wale wirnika silnika podczas normalnej pracy maszyny. Napięcie to, którego wartość międzyszczytowa

może osiągnąć 70 V i więcej, można łatwo zmierzyć oscyloskopem, przykładając końcówkę pomiarową przyrządu do wału wirnika pracującego silnika (rys. 1).

Jeśli napięcie to osiągnie wielkość wystarczającą do pokonania własności izolacyjnych warstewki smaru w łożysku, nastąpi wyładowanie elektryczne i przepływ prądu przez ścieżkę o najmniejszej rezystancji – zwykle łożyska silnika – do obudowy maszyny. (Łożyska są projektowane do pracy z bardzo cienką warstewką smaru pomiędzy bieżnią a elementami tocznymi.) Praktycznie w każdym cyklu komutacyjnym inwertera następuje wyładowanie elektryczne z wału wirnika do obudowy poprzez łożyska, pozostawiające miniaturowe kraterki elektroerozyjne w powierzchni bieżni łożyskowej.



Rys. 1. Napięcie na wale wirnika silnika podczas normalnej pracy maszyny

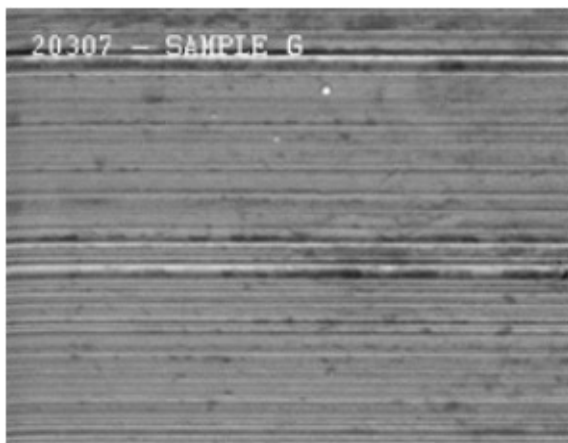
Te wyładowania są tak częste, że w niedługim czasie cała bieżnia łożyskowa pokrywa się niezliczonymi mikrowżerami i matowieje. W miarę postępowania degradacji matowienie wzrasta, prowadząc w efekcie do wzrostu hałasu i awarii łożysk. Może wystąpić również zjawisko żłobkowania, powodujące powstawanie poprzecznych bruzd i grzbietów („tarki”) na zmatowiałej powierzchni bieżni łożyskowej. Żłobkowanie może powodować nadmierne szумы i drgania, które w systemach grzewczych, wentylacyjnych i klimatyzacyjnych będą wzmacniane i rozprawdane przez przewody systemowe. Niezależnie od rodzaju uszkodzenia łożyska lub bieżni, wynika z niego awaria silnika często kosztuje tysiące lub nawet dziesiątki tysięcy dolarów z powodu przestojów i strat w produkcji.

Tempo występowania awarii, jest zależne od wielu czynników, zmienia się w szerokim za-

kresie. Dostępne dane wskazują, że znaczna część uszkodzeń ma miejsce w okresie od 3 do 12 miesięcy od uruchomienia instalacji. Współczesne silniki prądu przemiennego są wyposażone w łożyska uszczelniane, co zapobiega wnikaniu w nie brudu i zanieczyszczeń, a najbardziej powszechną przyczyną awarii łożysk w silnikach dołączonych do falowników są uszkodzenia elektroerozyjne. Jeśli założymy, że połowa wszystkich awarii silników prądu przemiennego jest spowodowana awarią łożysk, to prawie 80% tych awarii wywołują uszkodzenia elektroerozyjne.

3.1 Bieżnia nowego łożyska

Oglądając ściankę bieżni nowego łożyska (Rys. 2) pod elektronowym mikroskopem skaningowym, widzimy gładką powierzchnię.



Rys. 2. Bieżnia nowego łożyska

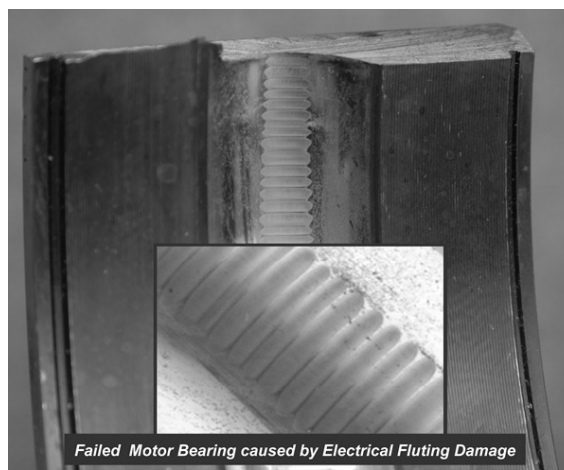
W miarę eksploatacji silnika na styku bieżni i kulek tworzy się z czasem ścieżka. Jeśli nie występują uszkodzenia elektroerozyjne, to ten rodzaj mechanicznego zużycia jest jedynym powodem degradacji.

3.2 Wżery

Zmatowiała powierzchnia bieżni łożyskowej po 5400 godzinach ciągłej pracy silnika z falownikiem. Wczesne stadium uszkodzeń przyjmuje postać mikrowgłębień (Rys. 3). Z każdym cyklem wyładowań elektrycznych od wału wirnika przez łożyska do obudowy silnika rośnie liczba i wielkość kraterów elektroerozyjnych. Wkrótce cała bieżnia pokryta jest milionami wgłębień. Nowe kratery elektroerozyjne powstają na miejscu starych i w końcu na powierzchni jest widoczny gołym okiem efekt „szronu”.



Rys. 3. Wżery jako wczesne stadium uszkodzeń



Rys. 4. Koncentracja wgłębień w regularnych odstępach wzdłuż bieżni łożyska

3.3 Żłobkowanie

Zjawisko nazywane żłobkowaniem występuje kiedy częstotliwość robocza falownika powoduje koncentrację wgłębień w regularnych odstępach wzdłuż bieżni łożyska, tworząc wzór „tarki” (Rys. 4). Taka faktura powoduje wibracje i hałas. W systemach grzewczych, wentylacyjnych i klimatyzacyjnych hałas może rozprzestrzeniać się po całym obiekcie poprzez kanały powietrzne.

4. Sposoby ograniczania uszkodzeń elektroerozyjnych powodowanych przez prądy łożyskowe

Jak pokazują powyższe przykłady, elektroerozyjne uszkodzenie łożysk silników zasilanych z falowników rozpoczyna się z początkiem eksploatacji i stopniowo narasta. Wskutek tych uszkodzeń następuje w końcu awaria łożyska. Aby zapobiec takim uszkodzeniom przede wszystkim należy zmienić drogę przepływu

prądów łożyskowych przez zastosowanie izolacji albo wytworzenie alternatywnej ścieżki do uziemienia.

4.1 Izolacja

Izolowanie łożysk silnika jest rozwiązaniem zmierzającym do przesunięcia problemu w inne miejsce, aby prądy łożyskowe znalazły sobie inną drogę do uziemienia. Niekiedy, wskutek efektu pojemnościowego izolacji ceramicznej, prądy pojemnościowe wielkiej częstotliwości generowane przez falownik w rzeczywistości przepływają przez łożysko, powodując jego uszkodzenia i awarię. Jeśli drogę prądu zapewniają napędzane urządzenia, na przykład pompy, to często kończy się to awarią łożysk tych urządzeń. Wdrożenie ochrony łożysk przez izolację może być kosztowne.

4.2 Zmiana ścieżek wyładowania

Sposób ten, właściwie zastosowany, jest lepszy od izolacji, ponieważ eliminuje prądy łożyskowe. Techniki realizacji różnią się kosztami, niektóre mogą być stosowane jedynie wybiórczo, ze względu na wielkość silnika lub warunki pracy.

Idealne rozwiązanie powinno gwarantować ścieżkę wyładowania o bardzo niskiej rezystancji od wału wirnika do obudowy, powinno dać się wykorzystać w możliwie najszerszym zakresie zastosowań napędów falownikowych, dostarczając najwyższy stopień ochrony łożysk przy największej opłacalności inwestycji.

5. Technologie ograniczania prądów łożyskowych

Obecnie istnieje wiele technologii ochrony łożysk silników prądu przemiennego przed uszkodzeniami elektroerozyjnymi, ale tylko kilka spełnia wszystkie warunki: skuteczności, ekonomiki i uniwersalności.

5.1 Ekranowanie

Ekranowanie zapobiega indukowaniu przez falownik napięcia na wale wirnika poprzez skuteczną barierę pojemnościową pomiędzy stojanem, a wirnikiem silnika. Zastosowanie tej technologii jest ekstremalnie trudne i bardzo kosztowne, dlatego praktycznie nie jest ona wykorzystywana.

5.2 Izolowanie łożysk

Materiał izolacyjny, zazwyczaj nieprzewodząca żywica epoksydowa lub warstwa ceramiczna, izoluje łożysko od obudowy i zapobiega prze-

pływowi przez nie prądów wyrównawczych. Zmusza to prądy łożyskowe do poszukiwania innej ścieżki przepływu do uziemienia, na przykład przez dołączoną pompę lub prądnicę tachometryczną lub nawet przez ładunek. Z powodu wysokich kosztów wykonania izolacji we wspornikach łożysk, to rozwiązanie jest zasadniczo ograniczone do większych silników z typoszeregu NEMA. Niekiedy prądy pojemnościowe wielkiej częstotliwości generowane przez falownik w rzeczywistości pokonują barierę izolacyjną, powodując zniszczenie łożyska. Inną wadą tego rozwiązania jest możliwość zanieczyszczenia izolacji, które z czasem może prowadzić do powstawania ścieżek prądowych przez łożysko.

5.3 Łożyska ceramiczne

Użycie w konstrukcji łożyska kulek z nieprzewodzącej prąd ceramiki zapobiega przepływowi prądu przez takie łożysko. Tak jak w przypadku innych technik izolacyjnych, prądy łożyskowe będą szukały alternatywnej ścieżki przepływu do uziemienia. Technologia ta jest bardzo droga, a w większości przypadków silnik z łożyskami ceramicznymi jest wykonywany na specjalne zamówienie i czas jego dostawy jest długi. W dodatku, z powodu różnej wytrzymałości na ściskanie łożysk ceramicznych i stalowych, łożyska ceramiczne muszą być w większości przypadków przewymiarowane, aby wytrzymać obciążenia statyczne i dynamiczne.

5.4 Smar przewodzący

Teoretycznie, ze względu na zawarte w nim cząstki przewodzące prąd elektryczny, taki smar powinien stanowić ścieżkę niskorezystancyjną, poprzez którą prądy łożyskowe przepłyną przez łożysko nie powodując uszkodzeń elektroerozyjnych. Niestety zawartość cząstek przewodzących w takim smarze zwiększa mechaniczne zużycie łożyska, obniża skuteczność smarowania i powoduje przedwczesne awarie. Ta metoda została powszechnie odrzucona jako realne rozwiązanie problemu prądów łożyskowych.

5.5 Szczotki uziemiające

Metalowa szczotka stykająca się z wałem wirnika jest bardziej praktycznym i ekonomicznym sposobem zapewnienia niskorezystancyjnej ścieżki przepływu prądu do uziemienia, w szczególności dla większych gabarytowo silników z typoszeregu NEMA. Jednak same

szczotki uziemiające są przyczyną kolejnych problemów:

- z powodu mechanicznego kontaktu z wałem wirnika podlegają zużyciu
- zbierające się na nich zanieczyszczenia powodują obniżanie się ich skuteczności,
- osadzająca się warstwa tlenków pogarsza skuteczność uziemienia
- wymagają konserwacji w regularnych odstępach czasu, co podnosi koszty.

5.6 Pierścień ochronny (SGR)

Ten zupełnie nowatorski sposób polega na zastosowaniu pierścienia ze specjalnie opracowanych, przewodzących mikrowłókien, do zmiany przepływu prądów łożyskowych i zapewnienia niezawodnej niskorezystancyjnej ścieżki prądowej od wału wirnika do obudowy silnika, z całkowitym pominięciem łożysk silnika. Zastosowana do wytwarzania mikrowłókien, opatentowana technologia przenoszenia elektronów (ETT) wykorzystuje zjawiska jonizacji do zwiększenia tempa przepływu elektronów i sprzyja wydajnemu odprowadzaniu prądów wielkiej częstotliwości, indukowanych przez falownik na wale wirnika. Setki tysięcy ścieżek prądowych, które tworzą mikrowłókna pierścienia SGR na obwodzie łożyska silnika, skutecznie chronią je przed uszkodzeniami elektroerozyjnymi. Pierścień ochronny AEGIS SGR jest rozwiązaniem, które może być zastosowane do praktycznie każdego silnika prądu przemiennego z każdym falownikiem.

6. Technologia przenoszenia elektronów (Electron Transport Technology™)

Technologia przenoszenia elektronów została wynaleziona przez amerykańskiego inżyniera Williama Oh z działu EST (Electro Static Technology) firmy ITW Company. Firma ta jest liderem w rozwijaniu i wdrażaniu rozwiązań techniki pasywnej jonizacji w przemyśle.

Pierścień ochronny AEGIS™ SGR™ z przewodzących mikrowłókien oferuje unikatowe połączenie korzyści, nieosiągalne w innych rozwiązaniach.

6.1 Zakres zastosowania

Technologię AEGIS można dostosować do dowolnego silnika z typoszeregu NEMA i do większych silników, niezależnie od średnicy wału czy zastosowania. Wprowadzony na rynek w maju 2005 r. pierścień SGR został zaprojektowany do silników NEMA i IEC o średnicy

wałów wirnika od 0,311” do 6,020” (6 do 153mm), a także do silników prądu przemiennego i stałego wielkiej mocy, o średnicach wałów do 30” (762mm). Pierścienie AEGIS SGR znalazły zastosowanie w generatorach mocy, turbinach gazowych, turbinach wiatrowych, silnikach i hamulcach dynamicznych trakcji prądu przemiennego, pomieszczeniach bezpyłowych, systemach klimatyzacyjno-wentylacyjnych i wielu innych dziedzinach przemysłu i handlu.

6.2 Montaż i konserwacja

Pierścień SGR montuje się bardzo prosto, nawsuwając go na którąkolwiek końcówkę wału wirnika i mocując śrubami uchwyty pierścienia do obudowy silnika. Ponieważ niepotrzebna jest obróbka, pierścień SGR można zainstalować w kilka minut, nawet w warunkach przemysłowych. Po zainstalowaniu pierścienia ochronnego SGR nie wymaga konserwacji. Ponieważ nie zawiera on elementów podlegających zużyciu, jego trwałość jest równa trwałości łożysk, które chroni. Wykonanie w wersji dzielonej umożliwia zainstalowanie pierścienia SGR na wale wirnika bez konieczności rozsprzęgania dołączonego urządzenia.

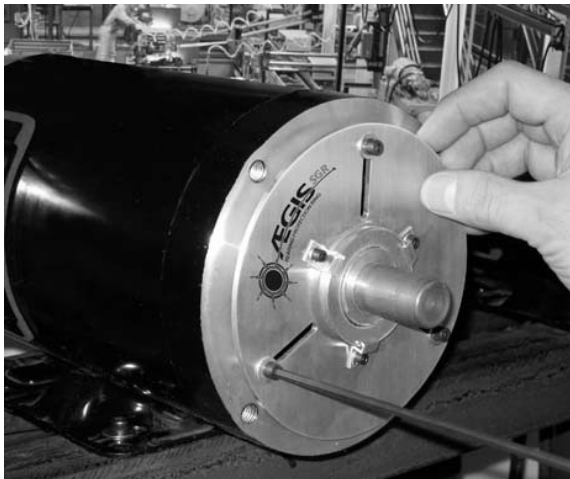
6.3 Niski koszt i wysoki zysk

Jednym z podstawowych celów podczas projektowania pierścienia AEGIS SGR było zaferowanie klientom rzeczywistej wartości. Napęd elektryczny, składający się z silnika prądu przemiennego i falownika, kosztuje zazwyczaj od 2 400\$ do ponad 100 000\$ i może stanowić element instalacji przemysłowej, która generuje w ciągu godziny pracy dochód od 10 000\$ do ponad 1 000 000\$. Koszt instalacji pierścienia AEGIS SGR w napędzie elektrycznym jest bardzo mały w porównaniu do kosztów całej instalacji, zwykle wynosi mniej niż 1% kosztów urządzeń.

Chroniąc łożyska przed uszkodzeniami elektroerozyjnymi, pierścień SGR chroni napęd elektryczny o regulowanej prędkości przed kosztownym przestojem z powodu nieplanowanej naprawy. W niektórych instalacjach przemysłowych, nawet chwilowy postój z powodu awarii silnika może kosztować ponad 250 000\$, nie licząc kosztów samej naprawy napędu.

Producenci silników i technolodzy w tych branżach przemysłowych, gdzie stosuje się napędy o regulowanej prędkości, w pełni zdają sobie sprawę z wagi problemów i kosztów powodowanych przez elektroerozyjne uszkodzenia łożysk.

żysk. Poświęcają oni wiele czasu, wysiłku i pieniędzy, aby znaleźć rozwiązanie tego problemu. AEGIS SGR™, pierścień z przewodzących mikrowłókien chroniący łożyska, jest obecnie najbardziej skutecznym i powszechnie uznanym rozwiązaniem.



Rys. 5. Pierścień AEGIS™ SGR™ z płytą montażową NEMA