

# Przegląd uszkodzeń izolacji uzwojeń silników elektrycznych

## Przyczyny, symptomy, skutki

Izolacja uzwojeń spełnia kluczową funkcję w prawidłowym działaniu silników i maszyn elektrycznych. Wpływ uszkodzeń mechanicznych (sił odśrodkowych, przycierania części ruchomych), naprężeń termicznych (wywołanych przeciążeniami silnika, wpływem warunków otoczenia) oraz uszkodzeń elektrycznych może doprowadzić do nieodwracalnych w skutkach awarii. W związku z powszechnością zastosowania napędów elektrycznych ważne jest zrozumienie zjawisk leżących u podstaw rozwoju uszkodzeń izolacji silników elektrycznych.

Uszkodzenia izolacji silników wynikają z kilku podstawowych przyczyn, m.in.: nieprawidłowego wykonania na etapie produkcji, degradacji termicznej lub elektrycznej oraz zużycia mechanicznego [1, 7]. Istotę problemu stanowi identyfikacja danego uszkodzenia we wczesnych etapach rozwoju, co umożliwia zahamowanie procesu degradacji, skutkującego tzw. awariami wtórnymi. Pojęcie awarii wtórnych [2, 4] związane jest z pośrednim wpływem skutków wywołujących rozległe uszkodzenia całego ustroju silnika napędowego.

### Degradacja termiczna

W przypadku degradacji termicznej uszkodzeniu ulegają najczęściej laminacja (w silnikach pierścieniowych) lub wirniki silników indukcyjnych klatkowych [7, 8]. Ogólną przyczyną jest wzrost temperatury, powodujący stopniowy spadek własności izolacyjnych elementów rdzenia silnika. Wzrost temperatury spowodowany jest przez zaburzenia obiegu czynnika chłodzącego (gazowego lub ciekłego, o obiegach swobodnym i wymuszonym). Przecieki czynnika chłodzącego powodują wzrost temperatury w rdzeniu silnika, co skutkuje wzrostem rozszerzalności elementów przewodzących. Z drugiej strony znaczący jest lokalny wzrost temperatury oraz naprężeń w uzwojeniach. Przegrzanie rdzenia pociąga za sobą zwiększenie kruchości izolacji, pęknięcie, poluzowanie oraz wyłamanie elementów izolacji. Taki stan wywołuje powstawanie zwarcí, które prowadzą najczęściej do spalania silnika.

Kolejnymi czynnikami przyspieszającymi degradację termiczną są praca w nieprawidłowych warunkach temperatury otoczenia oraz zaburzenia obiegu czynnika chłodzącego. Zaburzenia termiczne mogą zostać wywołane także przez silnie zapyłone środowisko układu napędowego lub zaolejenie. W tym przypadku podstawowym symptomem są zwarcia lub lokalny wzrost temperatury. Przebieg uszkodzeń, w przypadku wymienionych czynników, jest tożsamy ze skutkami przecieków czynnika chłodzącego [1, 7].

Przyczyną przyspieszenia przebiegu degradacji termicznej mogą być także uszkodzone pręty wirnika silnika elektrycznego. Najczęściej podstawową przyczyną jest uszkodzenie zębów wirnika silnika (co powoduje lokalny wzrost temperatury uzwojenia) oraz skutkujące tym przegrzanie. Taki stan wpływa na zwiększenie kruchości izolacji, jej pęknięcie, poluzowanie i w efekcie odsłonięcie części przewodzących uzwojeń. Lokalny wzrost temperatury prowadzi do stopienia izolacji oraz powstawania zwarcí doziemnych.

### Niska jakość użytych materiałów lub nieprawidłowości w procesie produkcji

Nieprawidłowości wynikające z niskiej jakości użytych materiałów lub procesu produkcji należą raczej do rzadkich przypadków. Jednak warto zwrócić uwagę na dopuszczenia oraz markę producenta, gwarantujące bezawaryjną pracę. Błędy wykonania są elementami związanymi z nieprawidłowo przeprowadzo-

nym procesem laminacji, niewłaściwym wykonaniem procesu odtłuszczenia lub parametrami technologicznymi procesu. Podstawowym efektem wymienionych czynników jest obniżenie parametrów eksploatacyjnych izolacji silników lub utrata adhezji do elementów przewodzących [1, 7]. W połączeniu ze wzrostem temperatury oraz drganiem występuje synergiczny efekt łuszczenia i oddzielania izolacji. W wyniku pracy silnika, z opisanymi niesprawnościami, wzmagają się efekty oddziaływania prądów wirowych (lokalny wzrost wartości temperatury prowadzący najczęściej do zwarcí), przyspieszających skutki zużycia termicznego. Występujące w tym przypadku pęcznienie izolacji skutkuje przegrzaniem ustroju silnika, co wywołuje stopienie rdzenia przewodzącego, zwarcia doziemne oraz całkowite spalanie silnika.

### Degradacja elektryczna

Nieprawidłowości pracy powodujące degradację elektryczną związane są najczęściej z parametrami strumienia magnetycznego obwodu wzbudzenia, ze zwarciami doziemnymi, z uszkodzeniami prętów oraz pierścieni zwarciovych wirników, a także wpływem niezbilansowanych sił elektromagnetycznych [1, 7, 8].

Zaburzenia strumienia magnetycznego wywołują występowanie lokalnego wzrostu temperatury (wskutek bezpośredniego oddziaływania strumienia lub prądów cyrkulacyjnych). Taki stan wpływa na zaburzenie współczynnika mocy silnika napędowego, co skutkuje spadkiem mocy ▶

## Niezbilansowane wartości sił elektromagnetycznych skutkują powstaniem nierównomiernego rozkładu oddziaływań na przewodniki rdzenia silnika.

► dostępnej na wale. Jest to także efektem zwiększenia strat energetycznych oraz wpływem narastających wartości prądów wirowych w uzwojeniach. Lokalny wzrost temperatury skutkuje powstawaniem naprężeń mechanicznych, które prowadzą do uszkodzeń mechanicznych izolacji (osłabienie, odkształcenie, rozluźnienie oraz powstawanie oscylacji i przemieszczeń przewodników). Następstwami wymienionych elementów są miejscowe nadtopienia przewodników silnika, rozprzestrzeniające się na całą strukturę układu napędowego (globalny wzrost temperatury, stopienie izolacji, spalanie izolacji), powodując nieodwracalne uszkodzenie silnika napędowego. Zwarcia doziemne uzwojeń statorów objawiają się w pierwszym etapie poprzez lokalny wzrost temperatury. Kolejno następują: przegrzanie, zmiany we współczynniku mocy oraz lokalne stopienie izolacji. W wyniku wzrostu temperatury postępuje czasowo topienie rdzenia uzwojeń oraz izolacji, a także spalanie rdzenia. Uszkodzenia prętów oraz pierścieni zwarciovych wirników, na wstępnym etapie, objawiają się poprzez postępujące czasowo pęknięcie elementów mechanicznych silnika. Pierwszym symptomem jest lokalny wzrost temperatury, powodujący występowanie miejscowych ognisk przegrzania. W wyniku różnic temperatur pojawiają się zmienne pola naprężeń, które powodują przemieszczenie elementów rdzenia przewodzącego silnika (w szczególnych przypadkach może nastąpić przycieranie wirnika o stator), co może doprowadzić do zwarcia doziemnego. Kolejno występują lokalne nadtopienia rdzenia, a w efekcie – spalanie rdzenia. W fazie rozwoju uszkodzeń, wynikających z uszkodzeń prętów oraz pierścieni zwarciovych wirników, znaczący jest także destrukcyjny wpływ strumienia magnetycznego oddziałującego na poluzowane elementy uzwojenia. Niezbilansowane wartości sił elektromagnetycznych skutkują powstaniem nierównomiernego rozkładu oddziaływań na przewodniki rdzenia silnika. Opisane

elementy mogą także spowodować poluzowanie uzwojeń, przycieranie wirnika o stator, zwarcia doziemne i nieodwracalne uszkodzenia silnika napędowego.

### Degradacja mechaniczna izolacji

Degradacja mechaniczna może wynikać z przyczyn nieprawidłowego wykonania, ze zbyt dużej podatności wirnika silnika, z przegrzania, uszkodzeń łożysk rotora, poluzowania elementów mechanicznych (w wyniku drgań ustroju napędowego od źródeł zewnętrznych lub drgań samowzbudnych) [1, 7, 8].

Niska jakość wykonania oraz zbyt duża podatność wirnika są elementami, które mogą wynikać ze złej jakości użytych materiałów, błędów produkcyjnych lub nieprawidłowości w konstrukcji. Wymienione elementy wpływają bezpośrednio na zmniejszenie wartości strumienia magnetycznego (co obniża całkowitą sprawność układu napędowego), powstanie niezbilansowanego rozkładu sił elektromagnetycznych, wzrost drgań uzwojeń. Już na tym etapie może dojść do stopienia rdzenia. Jednak w wielu przypadkach rozwój uszkodzenia postępuje stopniowo, prowadząc do odkształcenia laminacji (najczęściej skrócenia), lokalnego lub globalnego wzrostu temperatury.

Uszkodzenie łożysk wirników jest z punktu widzenia diagnozy silnika najłatwiejszym do identyfikacji symptomem. Uszkodzenie wykryte we wczesnej fazie pozwala na uniknięcie kosztownych i groźnych w skutkach awarii. Przycieranie wirnika o stator, może zostać zidentyfikowane w widmie drgań, jednak jest także zauważalne jako obniżenie prędkości obrotowej wału silnika, a także wzrost temperatury łożyska. Wytarcie izolacji prowadzi do zwarcia doziemnych i globalnego wzrostu temperatury, objawiającego się spalaniem silnika oraz stopieniem izolacji. Uszkodzenia związane z poluzowaniem elementów mechanicznych są związane z obecnością ciał obcych (najczęściej części złącznych lub komponentów konstrukcyjnych silnika), które wywołują iskrzenie,

lokalny wzrost temperatury i przegrzanie, degradację laminacji i zwarcia. Wysoki poziom drgań samowzbudnych układów napędowych objawia się zaburzeniem parametrów zasilania poszczególnych faz silnika. Straty strumienia magnetycznego powodują spadek mocy silnika (w początkowych etapach rozwoju efekt jest jednak niezauważalny). Kolejnym symptomem jest zaburzenie sił elektromagnetycznych wirnika wywołujące poluzowanie oraz przemieszczenie przewodników. Ostatnim etapem jest całkowite zniszczenie izolacji.

### Zapobieganie skutkom uszkodzeń izolacji uzwojeń

Zapobieganie skutkom opisanych uszkodzeń jest stosunkowo proste. Pomijając w analizie fakt możliwości wystąpienia szkodliwych czynników wywołanych błędami produkcji lub złą jakością użytych materiałów, głównym elementem zapobiegawczym jest okresowe wykonywanie przeglądów i stosowanie się do wymagań eksploatacyjnych układów napędowych [3, 5, 6].

Z punktu widzenia analiz wspólnym symptomem wszystkich uszkodzeń jest wzrost temperatury. W przypadku uszkodzeń termicznych przebieg uszkodzenia i dynamika rozwoju zależą od strefy wpływu ciepła. Identyfikacja początkowych etapów degradacji termicznej izolacji rdzenia jest możliwa tylko za pomocą kontroli wizualnej [7]. W końcowej fazie uszkodzenia znalezienie pierwotnego źródła awarii staje się praktycznie niemożliwe.

### Podsumowanie

Wielu uszkodzeń izolacji silników elektrycznych można uniknąć poprzez właściwe użytkowanie napędu, tj. prawidłowy dobór warunków pracy (obciążenia, cykli pracy, temperatury otoczenia) oraz okresowe czynności wykonywane w fazie przeglądów silników. Identyfikacja źródeł uszkodzenia może stanowić jednak znaczący problem, zwłaszcza w przypadkach objawiających się globalnym wzrostem temperatury oraz spalaniem silnika. Trudne do zauważenia są także wczesne etapy uszkodzeń, jednak możliwe jest uniknięcie awaryjnego zatrzymania przez monitorowanie temperatury, pomiar drgań oraz analizę parametrów elektrycznych. □

**Piśmiennictwo dostępne w redakcji.**