

# PRĄDY BŁĄDZĄCE A UTRZYMANIE RUCHU

Ryszard Nowicki

## 1. Wprowadzenie

Problematyka utrzymania ruchu (UR), w szczególności dla maszyn i urządzeń krytycznych oraz tych innych, które mają duże znaczenie dla realizowanego procesu produkcyjnego, jest nierozzerwalnie związana z potrzebą oceny stanu technicznego. Jedną z przyczyn prowadzących do przyspieszonej utraty integralności mechanicznej są pasożytnicze efekty elektryczne, zwane też błędzającymi: napięcia błędzące i prądy błędzące [1].

Napięcia błędzące to występowanie potencjału elektrycznego między dwoma obiektami, które w idealnym przypadku nie powinny mieć między sobą żadnej różnicy napięć. Natomiast jeśli występuje, to może dojść do rozładowania i popłynie prąd błędzący. Pojęcie to odnosi się do wszelkiego rodzaju prądów elektrycznych, które odgałęziają się z obwodów roboczych przeznaczonych konstrukcyjnie dla przepływu prądu i przepływają w sposób projektowo nierozpatrywany. Tak więc odnosi się ono do istnienia potencjału elektrycznego, jaki można znaleźć między obiektami, które nie powinny być poddawane działaniu napięcia. Prądy takie pojawiają się zarówno w systemach statycznych, jak i w maszynach wirnikowych. Szczególnymi przypadkami są prądy płynące w ziemi oraz prądy pojawiające się na mechanicznych elementach konstrukcyjnych maszyn, które nie są obwodami elektrycznymi.

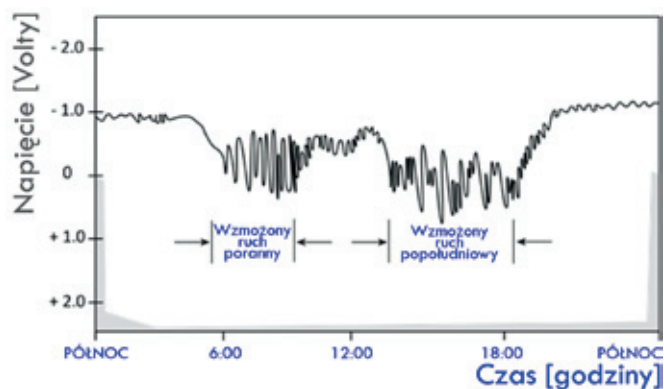
W maszynach mogą się one generować za przyczyną indukowanych napięć, a także specyficznych nieprawidłowości, jak np. (I) magnetyzm szczątkowy, (II) przyczyny wykonawcze elementów maszyn powodujące nierównowagę strumienia, (III) zmiany stanu technicznego elementów maszyn prowadzące do nierównowagi strumienia, (IV) gromadzenie ładunków elektrostatycznych w maszynach przepływowych.

Wyróżnia się trzy następujące kategorie prądów błędzących: (I) bezpośrednie (DC), (II) przemienne (AC), oraz (III) telluryczne<sup>1</sup>.

Bezpośrednie prądy błędzące mogą mieć różny charakter w czasie. W aglomeracjach miejskich prądy te są przyczyną uszkodzeń korozyjnych wszelkich konstrukcji metalowych, głównie podziemnych rurociągów stalowych – w tym także ciepłowniczych. Występują one przez cały czas i charakteryzują się dodatnim lub ujemnym potencjałem, a ich zmienność zależy od pory doby. Na rys. 1 pokazano przykładowo zmiany potencjału w wybranym punkcie stalowego wodociągu miejskiego w uzależnieniu od aktywności miejskiej w różnych godzinach doby. Do czynników, które na niego wpływają należy aktywność środków transportu wykorzystujących jako zasilanie napięcie stałe oraz rozwiązania konstrukcyjne napędu. Np. silnik napędowy pojazdu szynowego może być wykorzystywany dodatkowo jako regeneracyjny hamulec elektryczny, tzn. w fazie hamowania może pracować jak generator i zwracać energię do sieci.

## Części artykułu

1. Wprowadzenie
2. Skutki tarcia
3. Konsekwencje niedoskonałości konstrukcji
4. Prądy a magnetyzm szczątkowy
5. Wytwórcze przyczyny magnetyzmu szczątkowego
6. Niedoskonałość zasilania napięciem sinusoidalnym
7. Niedoskonałość zasilania impulsowego
8. Wpływ długości kabla zasilającego
9. Prądy pasożytnicze w silnikach elektrycznych
10. Prądy pasożytnicze w maszynach roboczych
11. Elektroerozja łożysk
12. Pomiar napięć i prądów wałowych
13. Przeciwdziałanie prądom łożyskowym na silniku
14. Gdzie mogą wystąpić problemy
15. Kiedy dochodzi do pojawienia się prądów pasożytniczych
16. Wpływ na mms
17. Monitorowanie dedykowane
18. Zakończenie
19. Literatura



Rys. 1. Przykład dobowej zmiany potencjału wodociągu zakopanego w ziemi wraz z przykładem perforacji spowodowanej prądami błądzącymi

W miastach prądy telluryczne wpływają nie tylko na rurociągi, ale także na zbrojenia podkładów (tramwajowych, kolejowych, metra – w szczególności z silnikami DC), konstrukcje nośne mostów i wiaduktów, konstrukcje stalowe tuneli, metalowe zbiorniki magazynowe etc.

Szkodliwy wpływ na infrastrukturę stalową ma miejsce nie tylko za przyczyną efektów elektrycznych generowanych od strony zasilania stałonapięciowego DC, ale także może on być potęgowany przez sieć energetyczną wysokiego napięcia AC. I tak dla przykładu:

- jeśli linia energetyczna przebiega ponad zakopanym w ziemi rurociągiem metalowym, to można się spodziewać pojawienia zmiennego napięcia między rurociągiem i ziemią – będzie ono miało tę samą częstotliwość co częstotliwość sieci;
- w ziemi można się również spodziewać prądów płynących między uziemieniami transformatorów AC wykorzystywanych na różnych poziomach transformacji od napięcia wysokiego do niskiego; taki przepływ może być np. konsekwencją braku zrównoważenia napięcia w poszczególnych fazach linii średniego napięcia.

Pojawiające się w ziemi prądy AC sumują się z prądami generowanymi przez napięcia stałe DC i wspólnie prowadzą do skrócenia żywotności elementów miejskiej infrastruktury stalowej. Proces ten posiada charakter ciągły w czasie choć o zmiennej intensywności. Prowadzi on do korozji elektrycznej. Korozja występuje w miejscach, w których różnica potencjałów powoduje wypływ prądu z konstrukcji stalowej, a jej intensywność jest skorelowana z natężeniem tego prądu.

## 2. Skutki tarcia

Już w świecie starożytnym (ok. 600 lat p.n.e.) prowadzono pierwsze eksperymenty dotyczące elektrostatyczności generowanej przez pocieranie dwóch ciał, z których jedno było bursztynem, ale dopiero 2500 lat później Robert Jemison Van de Graaff zbudował urządzenie umożliwiające gromadzenie ładunków w sposób zamierzony. Skonstruowany przez niego generator<sup>2</sup> wykorzystał intencjonalnie efekt tarcia suchego. Natomiast w licznych sytuacjach takie generowanie ładunków zachodzi również w sposób niezamierzony. Może ono wystąpić

np. między dwoma elementami konstrukcyjnymi maszyny, które w normalnych warunkach roboczych nie kontaktują się, a więc pozostają nawzajem do siebie obojętne elektrycznie. Może się jednak też zdarzyć, że znajdą się one w kontakcie krótkotrwałym, okresowym lub stałym. Przykłady takiej sytuacji to np. bezpośredni kontakt czopa z łożyskiem ślizgowym (np. spowodowany nadmiernym przeciążeniem promieniowym wirnika lub tzw. głodem olejowym) czy też naruszenie poprawności współpracy elementów uszczelnienia mechanicznego wirnika maszyny (np. spowodowane przeciążeniem termicznym, zużyciem, atakiem chemicznym). Tarcie dwóch różnych metali towarzyszy przemieszczanie elektronów, a ich znaczne nagromadzenie będzie skutkowało wyładowaniem elektrycznym, które w maszynie może także zachodzić między jej elementami nieruchomymi.

Do gromadzenia ładunków dochodzi również w wyniku tarcia będącego konsekwencją pozostających w ruchu wzajemnym dwóch różnych ośrodków i niekoniecznie musi to być, tak jak opisano w powyższych przykładach, kontakt ciał stałych. Efekty elektryczne pojawiają się w wyniku kontaktu płynu z ciałem stałym. Może to być np. tarcie między jakimś statycznym urządzeniem mechanicznym (np. kanał) lub ruchomym (np. wirnik, przekładnia pasowa) a pozostającym z nim w kontakcie gazem. Ruchowi gazu w kanale lub ruchowi elementu maszyny w płynie może towarzyszyć gromadzenie ładunku elektrycznego. Wiadomo np., że: [1] procesowi rozprężania mokrej pary towarzyszy naładowanie elektrostatyczne<sup>3</sup>, tak więc w rezultacie jej kontaktu z łopatkami turbiny pojawia się przepływ ładunków w elementach mechanicznych turbiny, [11] olej w pracującej przekładni może podlegać efektom tryboelektrycznym [2]. W konsekwencji, po odpowiednio dużym nagromadzeniu ładunków, dochodzi do krótkotrwałego rozładowania, co jest równoznaczne z chwilowym, tzn. krótkim w czasie, przepływem prądu.

Takie pasożytnicze zjawiska elektryczne mogą mieć charakter zarówno ciągły, jak i chwilowy, a czasem okresowy. Najpierw ma miejsce proces gromadzenia ładunków, a potem następuje krótkotrwałe rozładowanie. Forma rozładowań może być uzależniona od intensywności gromadzenia ładunku, od oporności elektrycznej ośrodka rozdzielającego materiały, w których gromadzą się ładunki dodatkowo i ujemne, a także od warunków środowiskowych (temperatura, ciśnienie, wilgotność), bowiem one również wpływają na oporność.

Przepływ prądu skutkuje pojawieniem się pola magnetycznego, które w przypadku materiałów ferromagnetycznych skutkować będzie pojawieniem się magnetyzmu szczątkowego<sup>4</sup>. Służby UR dokonują naprawy. Jednak prawie zawsze sprowadza się ona jedynie do działań mechanicznych (np. naprawa czopa – łożysko, wymiana uszczelnienia). Tak więc nagromadzony magnetyzm szczątkowy najczęściej pozostaje, a po ponownym włączeniu maszyny do procesu produkcyjnego może podlegać dalszej kumulacji. W konsekwencji w systemie wirnikowym pojawiać się będą odpowiednio większe prądy błądzące pochodzenia elektromagnetycznego.

Ładunek elektrostatyczny gromadzący się na wale powoduje przepływ prądu stałego, który jest mniej szkodliwy niż skutki przepływu prądu zmiennego, bowiem jest łagodniejszy. Uszkodzanie postępuje powoli i zawsze występuje w miejscu

o najmniejszej rezystancji, co można przypisać właściwościom smaru, np. jego lokalnemu naładowaniu czy lokalnej czystości naelektryzowanych powierzchni.

### 3. Konsekwencje niedoskonałości konstrukcji

W przypadku silników i generatorów dąży się do konstrukcji możliwie dobrych obwodów magnetycznych wirników oraz do możliwie dużego podobieństwa obwodów elektrycznych poszczególnych faz stojana, bowiem doskonałość ich wykonania wpływa bezpośrednio na sprawność, a wszelkie niedoskonałości będą powodować generowanie niechcianych efektów elektrycznych. Strumień magnetyczny w wirnikowej maszynie elektrycznej winien być w pełni kontrolowany, co oznacza, że odstępstwo od ideału będzie prowadzić do pojawienia się prądów pasożytniczych w jej elementach.

Asymetrie mogą mieć miejsce za przyczyną magnetyzmu szczątkowego, nasycenia magnetycznego, zniekształceń magnetycznych i elektrycznych tak wirnika, jak i stojana. W urządzeniu wiruje wirnik, a w stojanie wiruje pole magnetyczne – pasożytnicze efekty elektryczne będą potęgowane tym bardziej, im większa będzie niewspółosiowość (statyczna, dynamiczna lub mieszana) stojana i wirnika.

Prądy pasożytnicze są bezpośrednio skutkiem:

- siły elektromotorycznej wału (prąd krążący);
- siły magnetomotorycznej wału (prądy lokalne);
- sprzężenia pojemnościowego pomiędzy uzwojeniem a strukturą magnetyczną;
- nieprawidłowości w obwodzie magnetycznym, które generują siłę elektromotoryczną między końcami wału.

### 4. Prądy a magnetyzm szczątkowy

Prądy pasożytnicze mogą prowadzić do trwałego namagnesowania fragmentów wału. Jeśli się pojawiają, to mogą przenosić się z wału maszyny elektrycznej na kolejny wał, jeśli ich połączenie jest zrealizowane z pomocą niez izolowanych sprzęgieł. Tak więc podobnie jak w przypadku wirników maszyn elektrycznych, także wirniki maszyn przepływowych (sprężarek, pomp, turbin, dmuchaw etc.), a także przekładni mogą nabawić się namagnesowania, które dodatkowo wniesie swój wkład w generowanie pasożytniczych prądów elektrycznych natury elektromagnetycznej. Poziom tego namagnesowania może się zmieniać w czasie użytkowania maszyn, a jego wartość może osiągać nawet 100 i więcej Gaussów<sup>5</sup>. Statystycznie problemy z prądami pasożytniczymi zaczynają się pojawiać, gdy szczątkowe namagnesowanie elementów przekracza 3 Gaussy<sup>6</sup>. Problem ten jest tym poważniejszy, im większa jest prędkość obrotowa wirnika. Zależność między prędkością obrotową wirnika i napięciem wałowym została pokazana na rys. 2 [3]. Im większa jest prędkość obrotowa wirnika, tym mniejsze namagnesowanie przyczynia się do pojawienia destrukcyjnych elektromagnetycznych prądów pasożytniczych. Można przyjąć także, że zagrożenie prądami pasożytniczymi jest skorelowane z gabarytami maszyny, a prąd przemienny nie zawsze pojawia się w miejscu najmniejszej rezystancji.

W tabeli podano [4] poziom maksymalnie akceptowanego namagnesowania dla wybranych części maszyn.



Rys. 2. Wielkość napięcia wałowego w zależności od prędkości obrotowej wału

Tabela 1.

DOPUSZCZALNE NAMAGNESOWANIE ELEMENTU MASZYNY wg [4]7	
POZIOM NAMAGNESOWANIA	ELEMENT KONSTRUKCJI MASZYNY
± 200µT (±2 GAUSSY)	Łożyska, uszczelnienia
± 400µT (±4 GAUSSY)	Korpusy maszyn oraz elementy stacjonarne
± 200µT (±2 GAUSSY)	Wały i inne elementy wirujące

5. Wytwórcze przyczyny magnetyzmu szczątkowego

Pewne procesy realizowane na metalach ferromagnetycznych w procesie produkcji skutkują pojawieniem się namagnesowania w produkcie.

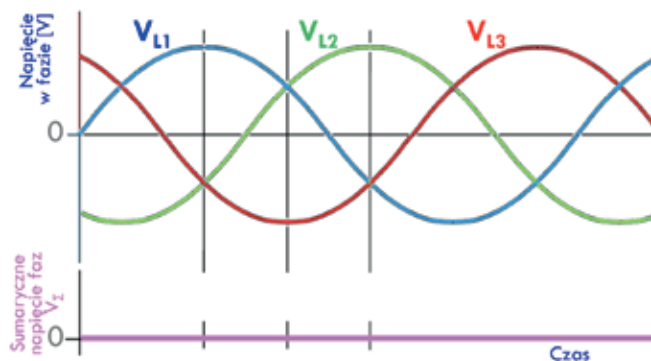
Niektóre z nich to:

- a) zginanie;
- b) tarcie między obrabianym elementem a wykorzystywanym w tym celu narzędziem (np. proces szlifowania bezkłowego, obróbka skrawaniem z wykorzystaniem nie dość ostrych narzędzi);
- c) wykorzystywanie uchwytów magnetycznych (np. w celach pomiarowych) mocowanych bezpośrednio do wykonywanego elementu;
- d) pola magnetyczne indukowane przy wykonywaniu pewnych kontrolnych badań nieniszczących (np. w niektórych procesach produkcyjnych elementów stalowych bywają prowadzone badania NDT z wykorzystaniem materiałów magnetycznych i prądów wirowych); pomimo tego, że po przeprowadzeniu takich badań wykonuje się zazwyczaj demagnetyzację, to jednak poddany badaniu element może zachować pewne szczątkowe magnesowanie;
- e) naruszenie procedur spawania (np. przez prowadzenie w obszarze produkcyjnym prac spawalniczych bez zapewnienia odpowiednio dobrego uziomu).

Zauważmy, że przyczyny c, d i e mogą także spowodować zmianę namagnesowania nie tylko w fazie produkcji, ale również w elementach już użytkowanych.

6. Niedoskonałość zasilania napięciem sinusoidalnym

W górnej części rys. 3 pokazano przypadek idealnie napięciowo zrównoważonych faz, tzn. charakteryzują się one identycznymi napięciami fazowymi, a ich przesunięcie fazowe wynosi 120°. W takiej idealnej sytuacji napięcie sumaryczne tych faz<sup>8</sup>  $V_{\Sigma} = 0$ , co jest pokazane w dolnej części rys. 3.



Rys. 3. Przypadek idealny, w którym suma napięć w fazach  $V_{\Sigma} = 0$

Zróznicowanie czy to w zakresie amplitudy napięcia w fazach, czy też odstępstwa od studwudziestostopniowego przesunięcia fazowego sygnałów będzie skutkowało pojawieniem się  $V_{\Sigma} = V_{CM} \neq 0$ . Więcej  $V_{\Sigma}$  nie musi być stałe w czasie, czyli  $V_{\Sigma}(t)$ .

W przypadku silników indukcyjnych napędzanych bezpośrednio napięciem  $V_{AC}$  mogą występować usterki: (I) kabli zasilających, (II) terminali przyłączających te kable do maszyny, (III) uzwojeń wewnętrznych silnika. Brak równowagi w impedancji lub rozkładzie obciążenia może przyczynić się do braku równowagi we wszystkich trzech fazach.

Jeśli napędy te charakteryzują się mocą powyżej kilkuset kW, to mogą na nich pojawić się również napięcia pasożytnicze. Będą one tym większe, im większa jest moc napędu i im mniej jego wirnik posiada biegunów, a więc jego prędkość obrotowa jest wyższa.

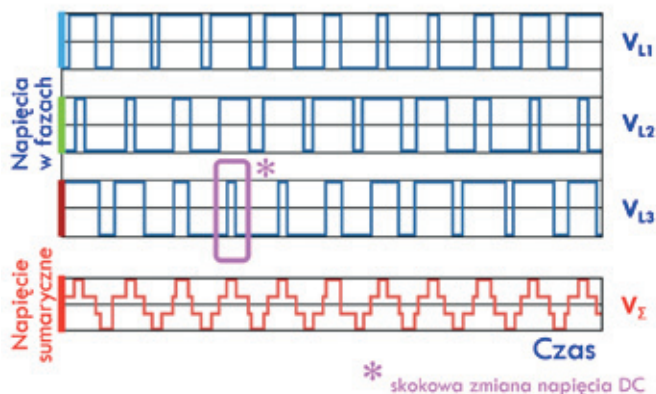
Znane są przypadki siników łożyskowanych ślizgowo, ale z pomocą łożysk bez izolacji elektrycznej, dla których niewielkie napięcie na wale na kierunku osiowym (niewielkie, bowiem wynoszące jedynie ~0,5 V RMS) powodowało prądy przepływające przez łożysko na poziomie nawet 20 A RMS [5]. Te przepływy prądowe nie są uzależnione od jakości uziemienia, bowiem zachodzą wewnątrz maszyny. Im ich natężenie jest większe, tym szybciej będą prowadzić do uszkodzenia łożysk powodowanych erozją elektryczną.

7. Niedoskonałość zasilania impulsowego

Nowoczesna przetwornica częstotliwości PWM<sup>9</sup> została po raz pierwszy opracowana w Strombergu w Finlandii na początku lat 60. XX wieku. Spopularyzowanie tej koncepcji sterowania zabrało ~20 lat. Od końca lat 80. przetwornice wykorzystywane są coraz częściej w coraz liczniejszych obszarach produkcji do sterowania prędkością obrotową silników indukcyjnych

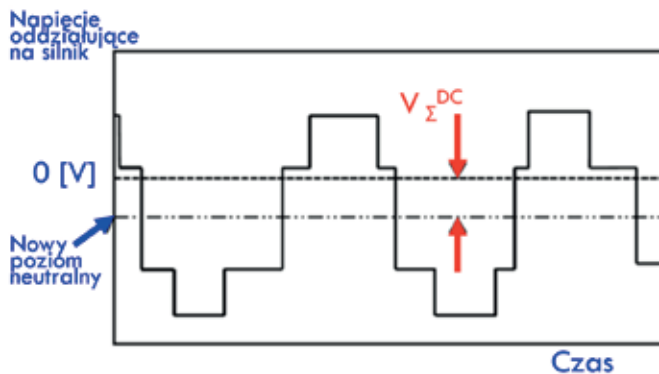
zasilaniem o zmiennej częstotliwości (VFD = *Variable Frequency Drives*). Dzięki temu w maszynach przepływowych możliwe jest lepsze sterowanie wydatkiem niż wykorzystywane w przeszłości (przy wykorzystywaniu silników stałoobrotowych) dławienie przepływu. Współcześnie rozwiązanie to jest powszechnie wykorzystywane do płynnego sterowania prędkością roboczą różnych maszyn, jak np. wentylatorów, pomp, sprężarek, a także pojazdów.

Sterowanie długością czasu przełączania napięcia stałego (tak, jak to pokazano w górnej części rys. 4) symuluje oddziaływanie na uzwojenia silnika podobne do tych, jakie mają miejsce przy oddziaływaniu napięciem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz, jednak w tym przypadku częstotliwością można sterować.



Rys. 4. Skokowa zmiana napięcia w fazach prowadzi do skokowej zmiany  $V_{\Sigma}$

O ile w przypadku napięcia sinusoidalnego można jeszcze oczekiwać, że napięcie sumaryczne w fazach  $V_{\Sigma}$  może mieć wartość zerową w funkcji czasu, o tyle już przy sterowaniu impulsowym będzie ono praktycznie zawsze, także skokowo, podlegać zmianie tak, jak to pokazano przykładowo w dolnej części rys. 4. Sumaryczne napięcie w fazach  $V_{\Sigma} = V_{CM}$  będzie składało się ze składowej zmiennonapięciowej  $V_{\Sigma AC}$  oraz stałonapięciowej  $V_{\Sigma DC}$  tak, jak to pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Składowe AC i DC napięcia  $V_{CM}$

Ze względu na wysokoczęstotliwościowe przełączania stosowane w przetwornicach PWM wszystkie napędy o zmiennej częstotliwości indukują prądy pasożytnicze w silnikach prądu

przemienne. Przełączanie tranzystorów bipolarnych z izolowaną bramką (IGBT), które są wykorzystywane w takich napędach, powoduje pojawienie się napięcia na wale silnika w warunkach jego normalnej pracy.

## 8. Wpływ długości kabla zasilającego

Ze względu na skokowe zmiany napięcia zasilającego na wyjściu z VFD należy się liczyć z pobudzeniem do drgań rezonansowych obwodów elektrycznych, które są poddane działaniu tego napięcia. Jedną z najważniejszych kwestii, które winny być brane pod uwagę, jest jakość i długość kabla zasilającego. Gdy sygnał AC napotyka nieciągłość impedancji, to dochodzi do „odbicia elektrycznego”. Tak więc w przypadku, w którym impedancja silnika jest większa niż impedancja kabla przewodzącego między silnikiem a przemiennikiem, przebieg napięcia odbija się na terminalach silnika. Takie odbicie będzie dodawać się z „falą biegnącą”, co może w szczególnych okolicznościach spowodować powstanie fali stojącej. Fale stojące powodują pojawienie się napięć wyższych niż pierwotne napięcie sygnału. W niektórych przypadkach efekt ten jest na tyle poważny, że spowoduje fizyczne uszkodzenie kabli lub podłączonych komponentów. Dłuższe kable silnika faworyzują fale stojące o wyższej amplitudzie. Znane są przypadki, kiedy to w systemie zasilania 480 V wystąpiły skoki napięcia do wartości 2150 V. Takie wysokie skoki będą prowadzić wstępnie do osłabienia, a w końcu do przebicia izolacji, co skutkuje zwarciami międzyfazowymi lub międzyzwojowymi.

Zaleca się, aby długość kabla zasilającego silnik z VFD nie przekraczała 100 m (lepiej: 30 m). W przypadku, kiedy długość jest większa, niepożądanemu efektowi odbicia należy zapobiegać poprzez dopasowanie impedancji obciążenia do impedancji charakterystycznej linii przesyłowej (w tym celu wykorzystywane są reaktory obciążeniowe), a dla długości powyżej 300 m konieczne jest stosowanie VFD ze specjalnymi filtrami (dolnoprzepustowymi) na wyjściu. Korzyści ze stosowania takich filtrów mogą już mieć miejsce przy odległościach między urządzeniami powyżej 100 m.

Podane powyżej długości winny być przestrzegane w przypadkach, w których pojedynczy VFD współpracuje z pojedynczym silnikiem. Natomiast w niektórych przypadkach taki pojedynczy VFD może być wykorzystywany do sterowania grupy silników. W takim przypadku kable zasilające muszą być krótsze. Można z grubsza założyć, że suma długości wszystkich kabli zasilających silników grupy nie powinna być większa od dopuszczalnej długości kabla wykorzystywanego do zasilania pojedynczego silnika.

W przypadku zignorowania powyższych zaleceń nie tylko mogą wystąpić problemy z pracą napędzanego przez VFD agregatu, ale także w środowisku pojawi się szum elektromagnetyczny, który może negatywnie wpływać na pracę innych systemów. Celem minimalizacji jego mocy wymaga się bardzo dobrego ekranowania kabli zasilających (oplot z drutu miedzianego o pokryciu co najmniej 80% z dodatkowym ekranowaniem ze specjalnej folii aluminiowej)<sup>10</sup>. Kable zasilające winny być prowadzone w niezależnych korytkach kablowych i znajdować się w wystarczającej odległości (ta odległość zależy od napięcia nominalnego) od kabli sygnałowych i sterujących.

### 9. Prądy pasożytnicze w silnikach elektrycznych

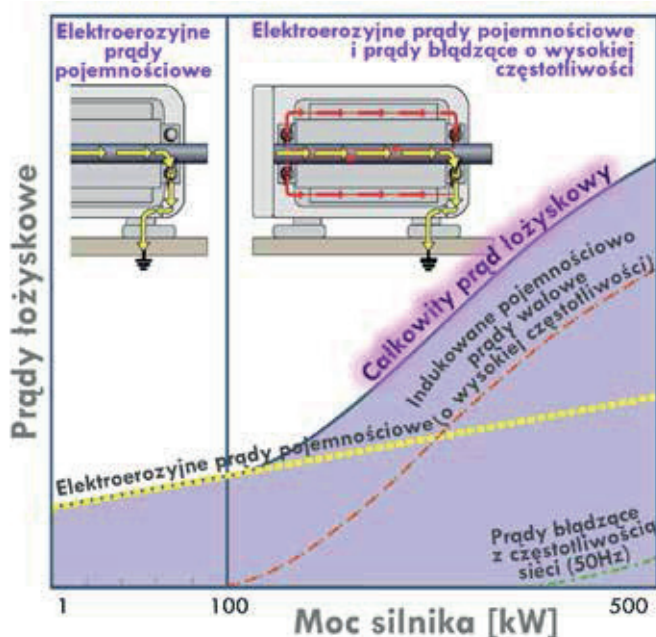
Prądy pasożytnicze generujące się w silnikach elektrycznych z napędem VFD przyczyniają się do przyspieszenia degradacji izolacji uzwojeń oraz mogą prowadzić do uszkodzeń łożysk. W tym drugim przypadku mówi się o pasożytniczych prądach łożyskowych. Na rys. 6 zilustrowano przepływ prądu pasożytniczego przez łożysko toczne, natomiast podobnie problem ten wygląda w przypadku łożysk ślizgowych, w których czopy są unoszone np. przez film olejowy.



Rys. 6. Prąd łożyskowy

Już w przypadku silników o niewielkiej mocy można się spodziewać wystąpienia elektroerozji będącej konsekwencją prądu pojemnościowego. Prądy pojemnościowe przepływające przez łożysko pokazano na rys. 7 żółtymi strzałkami.

W przypadku silników o mocy powyżej ~100 kW pojawia się dodatkowo składowa prądu wałowego indukowana pojemnościowo (o wysokiej częstotliwości). Prądy pojemnościowe cyrkulujące między stojanem a wałem pokazano na rys. 7 czerwonymi strzałkami. Natomiast w silnikach o mocy kilkuset kW i wyższej trzecią składową, która przyczynia się do elektroerozji, są prądy błądzące o częstotliwości zasilania.



Rys. 7. Składowe sumarycznego prądu pasożytniczego w funkcji mocy silnika

Na rys. 7 pokazano zróżnicowanie prądów łożyskowych w zależności do mocy silnika oraz ich jakościowy wpływ na całościowy prąd łożyskowy.

Jeśli nie zostaną zastosowane jakiegś formy zapobiegania, to napięcia wałowe indukowane przez VFD mogą prowadzić do awarii silnika. Wtedy, kiedy napięcia na wale silnika przekroczą zdolność izolacyjną smaru łożyskowego, popłynię do ziemi prąd łożyskowy (co pokazano na rys. 6) powodujący erozję elektryczną elementów łożyska tocznego. W przypadku łożysk ślizgowych po przekroczeniu zdolności izolacyjnej filmu olejowego erozji podlega w przypadku łożyska poprzecznego zarówno panewka, jak i czop, a w przypadku łożyska osiowego tak segment łożyska, jak i kołnierzy oporowy<sup>11</sup>.

Znane są przypadki, w których na niewielkich silnikach łożyskowych tocznie napięcia wałowe osiągały wartość powyżej 70 V<sub>PEAK-PEAK</sub>.<sup>12</sup> Prądy przepływające przez łożysko powodują lokalny wzrost temperatury. Ten wzrost temperatury może być:

- niewielki, a więc taki, który jeszcze nie powoduje odpuszczania zahartowanego materiału i żadne zmiany w łożysku nie są obserwowane;
- już taki, który powoduje zmiany słabo widoczne gołym okiem, bowiem jest to lokalne odpuszczenie zahartowanego materiału (bieżni pierścienia łożyska, a więc zmiana struktury metalograficznej); możliwa jest też zmiana kolorystyki; przy nieco wyższej temperaturze będzie dochodzić do jego mięknięcia;
- wyższy od temperatury topienia metalu, z którego wykonane są elementy łożyska; wtedy dochodzi do lokalnego wytopienia materiału, co powoduje wżery, kratery i żłobienia na powierzchniach współpracujących elementów.

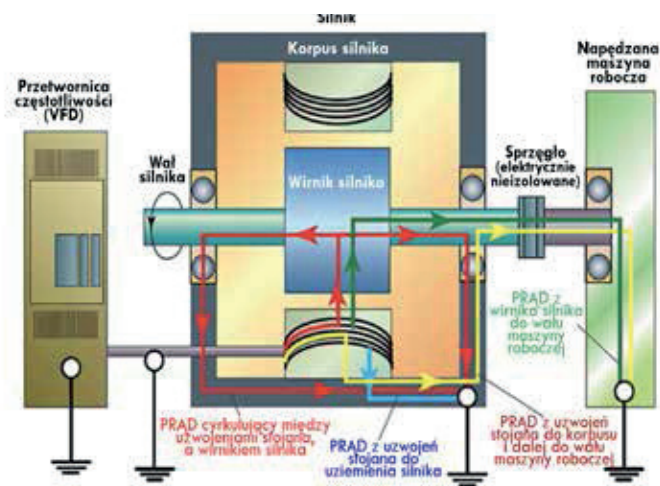
Naruszenie kształtu współpracujących elementów łożyska tocznego objawia się wtórnie podniesieniem poziomu hałasu propagowanego z węzłów łożyskowych, a także wzrostem ich temperatury. Są to symptomy zbliżającej się awarii silnika. Naruszenie geometrii kształtu w łożysku ślizgowym prowadzi do pogorszenia jego warunków pracy, co w przypadku braku monitorowania węzła łożyskowego, przy zaawansowanej destrukcji, prowadzi do katastroficznego uszkodzenia maszyny.

Większość silników łożyskowych tocznie jest zaprojektowana na 100 000 godzin pracy, jednak silniki sterowane przez VFD mogą ulec awarii w ciągu jednego miesiąca, tzn. po około 700 godzinach. Zastosowanie VFD dla silników, które konstrukcyjnie nie były przygotowane do takiej aplikacji, skutkuje często pojawieniem się problemów ruchowych, które nie miały miejsca wcześniej. Są statystyki mówiące, że ~41% awarii w takich silnikach jest wynikiem prądów łożyskowych generowanych przez niezrównoważony rozkład prądu z VFD.

### 10. Prądy pasożytnicze w maszynach roboczych

Zastosowanie zabezpieczenia przed prądami łożyskowymi silnika nie gwarantuje jeszcze unikania problemów erozji elektrycznej w innych częściach agregatu.

Na rys. 8 pokazano prądy pasożytnicze generujące się w silniku, które poprzez sprzęgło przenoszą się z wału silnika na wał maszyny roboczej, a następnie poprzez łożyska na jej korpus. Taka sytuacja może mieć miejsce wtedy, gdy sprzęgło jest w wersji nieizolowanej, a oporność elektryczna systemu wirnikowego



Rys. 8. Prądy przepływające przez łożysko maszyny roboczej

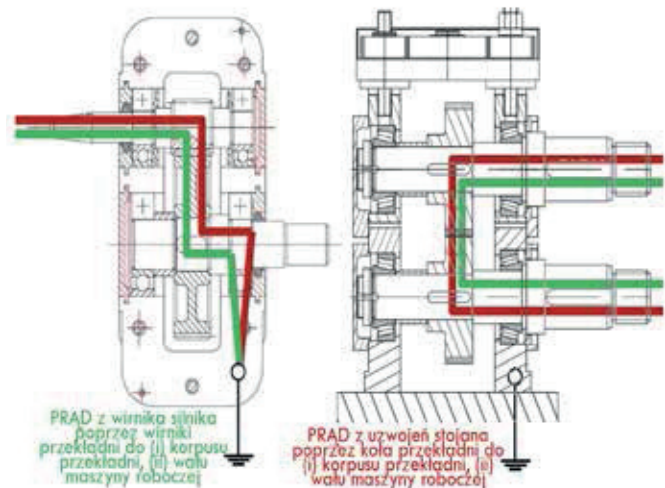
do korpusu maszyny roboczej jest mniejsza niż do korpusu silnika.

Ślady erozji elektrycznej powodowanej przez prądy pasożytnicze mogą być rozpoznane na stykach części maszyn pozostających w kontakcie, ale niebędących w stałym połączeniu, jak np.:

- Łożyska ślizgowe: w punkcie podparcia segmentów zarówno łożyska ślizgowego promieniowego, jak i osiowego na powierzchniach elementów, z którymi współpracują łożyska ślizgowe, tzn. na czopach oraz na kołnierzu oporowym na wale.
- Koła przekładni zębatej: na rys. 9 pokazano możliwe przepływy prądowe przez przekładnie: z lewej strony prądy przepływają przez koła zębate i następnie przez łożysko przekładni do jej korpusu, natomiast z prawej prądy przepływają z wału napędowego poprzez koła zębate, a następnie na wał napędzający maszynę roboczą.
- Elementy kół zębatych rozrządu w silnikach spalinowych.
- Zęby na połączeniu sprzęgła zębatego łączącego kolejne wały (a także elementy sprzęgieł nieizolowanych innych niż sprzęgła zębate).
- Uszczelnienia pływające: ślady erozji mogą być widoczne między materiałem uszczelniającym a wałem, jak również między tymże materiałem a pierścieniem nośnym uszczelnienia, bowiem prądy błądzące mogą tworzyć zamkniętą pętlę między uszczelnieniem, wałem i obudową łożyska. Prąd przepływający między różnymi częściami maszyn, które współpracują z olejem, powoduje także przyspieszenie degradacji oleju, bowiem w oleju pojawiają się nie tylko produkty zużycia pochodzenia metalicznego (a czasem i poza metalicznego), ale także pojawia się lakier.

## 11. Elektroerozja łożysk

Elektroerozja powodowana przez prądy błądzące będzie się różnie objawiać w zależności od rodzaju powodującego ją napięcia. Jeśli mamy do czynienia z  $V_{DC}$ , to jak już – wspomniano wyżej – erozja będzie się pojawiać w miejscu, z którego prąd wypływa. Jeśli natomiast przyczyną jest  $V_{AC}$ , to jego skutki są widoczne dla obu powierzchni, między którymi następuje iskrzenie. Przepływ może być również zróżnicowany w dłuższym

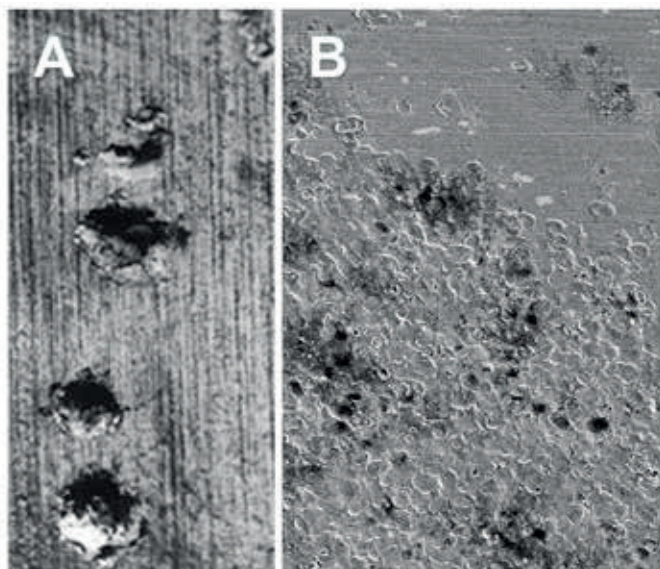


Rys. 9. Prądy pasożytnicze przepływające przez przekładnie zębate

czasie, tzn. może być chwilowy lub ciągły, a ślady po iskrzeniu mogą być lokalne (tzn. punktowe) lub powierzchniowe.

Efekt elektroerozji może przyjmować różną postać w zależności od natężenia przepływającego prądu, długości czasu wyładowania, a także jednorodności smaru lub oleju. Na rys. 10 pokazano minikratery będące skutkiem krótkotrwałych wyładowań punktowych (w piśmiennictwie angielskim są zwane *pittingiem*). Na rysunku A widoczne są pojedyncze wytopienia, a na rysunku B [6] ich duża koncentracja na ograniczonej powierzchni, skutkująca zmatowieniem, które nazywane jest czasami zaszczeniem (*frosting*). Do zaszczenia dochodzi na skutek słabych krótkotrwałych wyładowań w długim czasie. To, co dodatkowo różni obydwie przypadki, to głębokość wytopień – w przypadku A są wielokrotnie głębsze niż w przypadku B. Ślady po iskrzeniu mogą przybierać alternatywnie postać linii podobnych do zarysowań spowodowanych ostrym narzędziem. W tym przypadku nie jest to wyładowanie krótkotrwałe, ale rozciągnięte w czasie (wyładowanie łukowe). W przypadku takich uszkodzeń liniowych dopiero analiza mikroskopowa umożliwi stwierdzenie, czy uszkodzenia są faktycznie efektem elektroerozji, bowiem w takim przypadku posiadają w dolnej części zarysowania wyblyszczanie spowodowane przez wytopienie, czy też są efektem skrawania. Zarysowania mogą mieć szerokości na poziomie ułamka milimetra (tzn. bardzo cienkie i o głębokość ~50 – 125  $\mu\text{m}$ ) lub też ich szerokość może dochodzić nawet do 3 mm i wtedy są odpowiednio głębsze. Tory różnią się długością i mogą osiągać nawet do kilku centymetrów. Długość śladu zależy od czasu trwania wyładowania oraz od prędkości wzajemnego przemieszczania się powierzchni, między którymi dochodzi do iskrzenia. Ślady nie muszą być prostoliniowe – mogą również zygzakować (w piśmiennictwie angielskim są zwane „robakami”). Naruszenie prostoliniowości śladu może być spowodowane zmiennymi właściwościami oleju między przemieszczającymi się powierzchniami, a także czystością samych powierzchni. Oba te czynniki wpływają na oporność elektryczną i w konsekwencji na trajektorię iskrzenia.

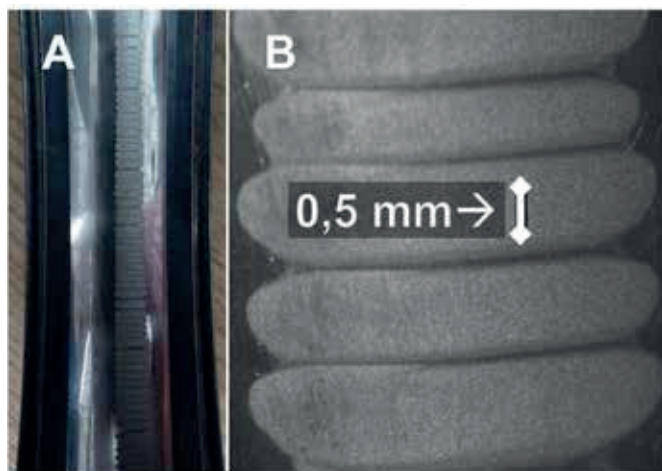
W obszarach zaszczenia mogą także pojawić się przyczernienia, za które są odpowiedzialne osady „przypalonego oleju” (lakier z oleju).



Rys. 10. Elektroerozja punktowa: (A) pojedyncze kratery; (B) duże ich zagęszczenie

Prądy łożyskowe, które w początkowej fazie destrukcji powodują erozję punktową, w dalszej fazie przyczyniają się do pofalowania powierzchni. Na rys. 11 pokazano efekt takiego pofalowania bieżni pierścienia zewnętrznego łożyska tocznego.

Efekt ten jest nazywany także żłobkowaniem, kanelowaniem lub tarkowaniem – od tarki do prania. Na rysunku B pokazano powiększenie, z którego wynika, że w tym przypadku szerokość pojedynczego żłobka wynosi  $\sim 1$  mm. Pokazane na rysunku A żłobki zajmują centralne położenie na bieżni.



Rys. 11. Typowy efekt tarki w pierścieniu zewnętrznym łożyska tocznego

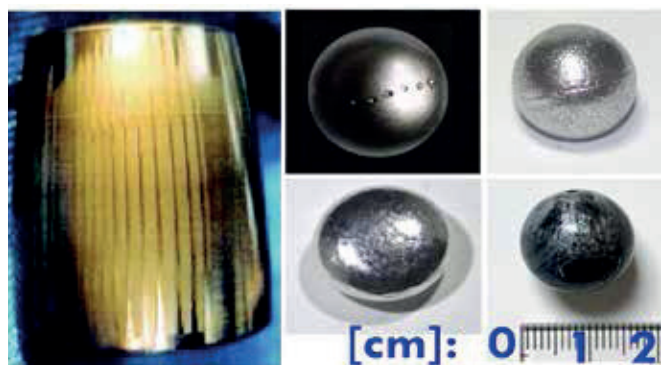
Na rys. 12 pokazano efekt elektroerozji obu pierścieni łożyska tocznego. W tym przypadku widoczne jest przesunięcie uszkodzenia w stosunku do centrum pierścienia, co jest spowodowane przez znaczną siłę osiową działającą na wirnik maszyny i w konsekwencji pracę łożyska jako oporowo-nośnego. Tego typu uszkodzenia występują na bieżniach łożysk kulkowych, baryłkowych oraz walczkowych. Żłobki są równoległe do osi walcowania i na ogół równomiernie rozmieszczone, tak jak to pokazuje rys. 11. Brak tak wyraźnego żłobkowania w przypadku pokazanym na rys. 12 jest spowodowany zmieniającym



Rys. 12. Pierścienie łożyska tocznego uszkodzone elektroerozją

się obciążeniem osiowym i w konsekwencji zmiennymi warunkami współpracy elementów łożyska, przez które przepływa prąd.

Efekt żłobkowania można również rozpoznać na elementach łożysk walczkowych i baryłkowych. Z lewej strony rys. 13 pokazano jego przykład dla pojedynczej baryłki. Żłobkowanie nie występuje na elementach tocznych łożysk kulkowych. Elektroerozja kulek skutkuje zmatowieniem ich powierzchni, a czasami widoczne są również minikratery co, pokazano po prawej stronie rysunku.



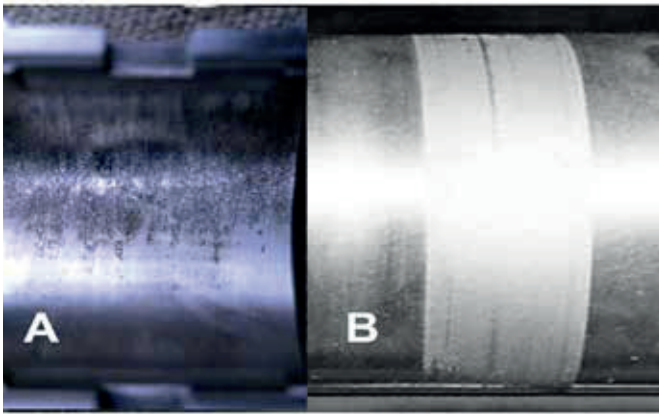
Rys. 13 Przykłady uszkodzeń elementów tocznych: żłobkowanie baryłki (po lewej) i różne uszkodzenia kulek (po prawej)

W przypadku maszyn o większej mocy dla mocowania wirnika są wykorzystywane łożyska ślizgowe. One także ulegają destrukcji w konsekwencji przepływu prądów pasożytniczych, które mogą powodować zarówno *pitting*, jak i *frosting*.

Na rys. 14 A pokazano półpanewkę, w której *pitting* pojawił się w miejscu najmniejszej oporności powodowanej przez film olejowy, a na rys. 14 B czop wału, który na całym obwodzie jest skażony *pittingiem*. Nie oznacza to jednak, że czop w jednej chwili poddawany jest wyładowaniom na pełnym obwodzie. Czop obraca się, a wyładowanie pojawia się tylko w tej jego obwodowej części, która pozostaje w najbliższym kontakcie z panwią.

Do podobnego uszkodzenia powierzchni czopa może także dochodzić z innych przyczyn. Tak więc dopóki nie powiększy się obrazu takiej zmatowanej powierzchni – co najmniej 30x – nie można mieć pewności, że jest to skutek elektroerozji. Zaniechanie takiego badania mikroskopowego prowadzi często do błędnych diagnoz, bowiem zmatowanie przypisuje się uszkodzeniu termicznemu lub przycieraniu.

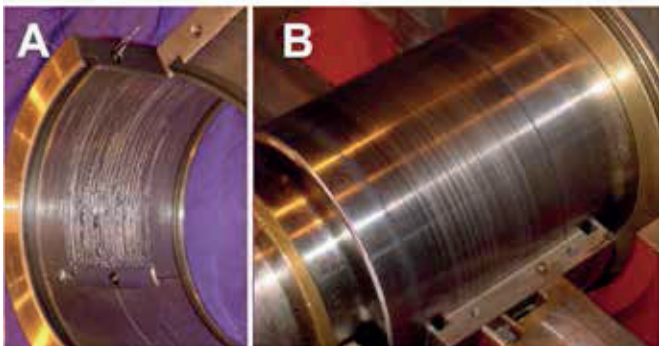




Rys. 14. Efekt pitingu po stronie (A) panwi łożyska oraz (B) czopa

Zmatowienie jest powodowane przez bardzo niewielkie prądy ( $<0,5$  A), co powoduje negatywne skutki w pracy maszyny po kilku latach. Degradacja w postaci zaszronienia przyczynia się do obniżenia zdolności nośnej łożyska i w konsekwencji może skutkować przytarciami między elementami maszyny.

W przypadku silniejszych prądów pasożytniczych (trwających dłużej w czasie) pojawiają się zarysowania takie jak pokazane na przykładzie jednego ze ślizgowych węzłów łożyskowych przekładni na rys. 15.

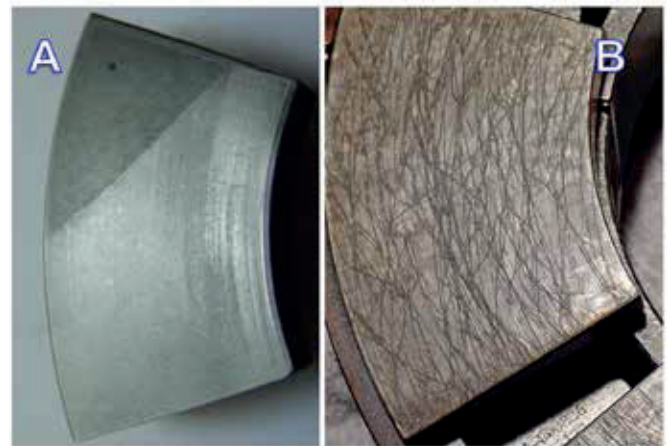


Rys. 15. Uszkodzone elektroerozją (A) łożysko przekładni i (B) współpracujący z nim czop

Podobnie jak to ma miejsce w przypadku poprzecznych łożysk ślizgowych, ulegają uszkodzeniu segmenty łożyska oporowego (osiowego), co pokazano na rys. 16. Na rysunku A widoczne jest zaszronienie zewnętrznej części segmentu łożyska po stronie sływu oleju. Jest to miejsce, w którym typowo film olejowy jest najcieńszy, a temperatura oleju najwyższa, co skutkuje najniższą opornością elektryczną [7]. Zazwyczaj podobne w kształcie zaszronienie występuje na wszystkich segmentach łożyska – brak podobieństwa wskazywałby na zróżnicowanie obciążenia segmentów. W przypadku wystąpienia wysokich prądów mogą wystąpić zarysowania powierzchni co pokazano na rys. 16 B.

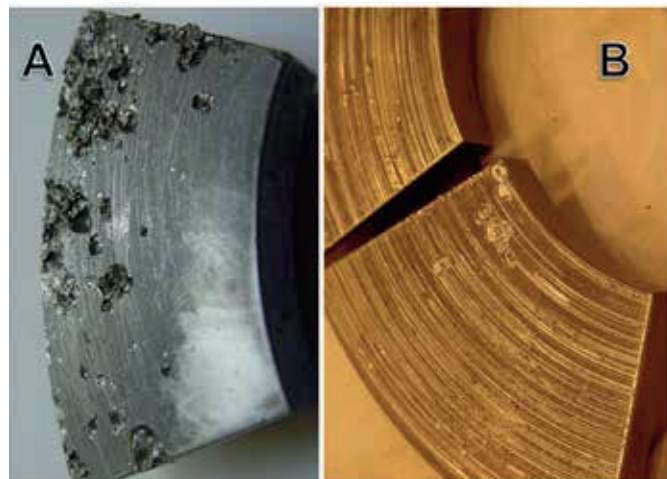
W przypadku przepływów prądowych mających miejsce w czasie postoju maszyny może dojść do zespawania elementów, które w warunkach ruchowych przemieszczają się względem siebie. W przypadku zespawania po uruchomieniu wirnika

dochodzi do wyrwania słabszego materiału. Takie wielkogabarytowe produkty zużycia (o wymiarach wykraczających poza 1 mm) mogą przemieszczać się wraz z olejem. Kiedy dostaną się one w strefę nośną filmu olejowego, będą powodować głębokie zarysowania i w konsekwencji dojdzie do pojawienia się w oleju kolejnych produktów zużycia.



Rys. 16. Segmenty łożyska oporowego uszkodzone elektroerozją: (A) zaszronienie; (B) zarysowania

Szereg ubytków spowodowanych wyrwaniami pokazano na rys. 17 A. Na rys. 17 B kilka głębokich kraterów jest widocznych po wewnętrznej stronie segmentu. Pokazane na rys. 17 B rysy mogą być pierwotnie spowodowane przez iskrzenie lub też są wynikiem skrawania mechanicznego powodowanego przez znajdujące się w oleju metaliczne zanieczyszczenia.



Rys. 17. Segmenty łożyska oporowego uszkodzone elektroerozją w konsekwencji zespawania: (A) kratery; (B) kratery i zarysowania

Zespawanie elementów może także wystąpić dla łożysk tocznych. Na rys. 18 zaznaczono ubytki materiału w dwóch wałeczkach spowodowane wcześniejszym zespawaniem.



Rys. 18. Uszkodzenie elementów łożyska w konsekwencji zespawania

Prądy błądzące mogą także cyrkulować między połączonymi ze sobą nieruchomymi elementami maszyny np. między częścią dolną i górną korpusu lub między stojakiem łożyskowym, a pokrywą łożyska. W wyniku cyrkulacji może dojść do zespawania wymienionych par.

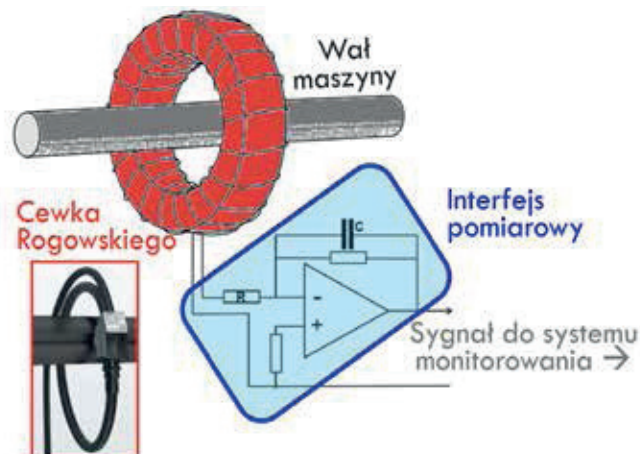
Zanieczyszczenia, które dostają się do oleju czy to w konsekwencji wytopień czy też lokalnych wyrwań materiału powodują wtórną destrukcję poprzez ścieranie co może prowadzić do pogorszenia właściwości nośnych filmu olejowego. Jeśli nośność będzie zbyt niska to może dochodzić do przypadków tarcia suchego, które zdecydowanie przyspiesza proces destrukcji.

### 12. Pomiary napięć i prądów wałowych

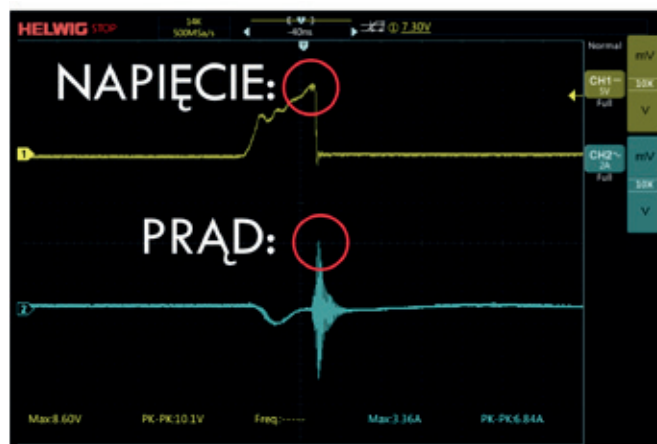
Celowe jest prowadzenie pomiarów zarówno napięć, jak i prądów wałowych. Najlepszą informację o szkodliwości wyładowania daje prąd, bowiem dla tego samego napięcia szczytowego, w zależności od oporności między elementami łożyska, może wystąpić przepływ prądu o różnym natężeniu, a destrukcja łożyska będzie skorelowana z tym natężeniem. Pomiar prądu na pracującej maszynie jest jednak trudny i wymaga zarówno specjalistycznej wiedzy technicznej, jak i specjalizowanego sprzętu. Z tego względu stan elektryczny wirnika estymowany jest zazwyczaj z pomocą pomiaru napięcia. Do testowania napięcia na wale używa się sondy, którą łączy się z przewodem uziemiającym obudowy silnika. Sonda na swoim końcu roboczym jest przewodzącą szczotką. Pomiar można prowadzić tak po stronie napędowej, jak i przeciwnapędowej silnika.

W celu pomiaru prądu może być wykorzystana cewka Rogowskiego. Z jej pomocą mogą być prowadzone pomiary prądów pojawiających się w wale maszyny, w stojaku łożyskowym, na kablach zasilających silnika. Na rys. 19 pokazano ideę pomiaru, a w lewym narożniku przykładową cewkę. Sygnał z jej interfejsu pomiarowego może być podłączony czy to do przenośnego analizatora sygnału, czy też do systemu monitorowania online.

Przykładowy wynik takiego pomiaru pokazano na rys. 20 [8]. Pokazuje on zmianę napięcia i natężenia w czasie. Czas trwania zaburzenia to ~30 ns, maksymalny wzrost napięcia (mierzonego z pomocą sondy BPK-PROBE™ – krzywa żółta) osiągnął ~8,6 V, a natężenia (mierzonego z pomocą cewki Rogowskiego – krzywa niebieska) ~3,4 A.



Rys. 19. Układ pomiarowy umożliwiający pomiar prądu



Rys. 20. Pomiary wyładowania pasożytniczego na wale

W przypadku agregatów, które wykorzystują napędy VFD, pomiary napięć wałowych winny być prowadzone:

- obligatoryjnie dla wszystkich nowych wdrożeń; celem takich badań jest sprawdzenie, czy napięcia wałowe są wystarczająco niskie, bowiem tylko wtedy nie będą miały miejsca zbyt częste awarie;
- kontrolnie co 2–3 lata, bowiem może się zdarzyć, że z jakichś przyczyn układ wirników nabędzie magnetyzmu szczałkowego, co może skutkować pojawieniem się napięć pasożytniczych<sup>13</sup>.

W przypadku maszyn szczególnie ważnych można zainstalować układ online monitorowania prądu. Maszyny tak kategorizowane są typowo wyposażone w system monitorowania stanu technicznego (umożliwiający m.in. pomiary drgań), który jest nadbudowany systemem diagnostyki. Do jednego z kanałów takiego systemu może zostać (na ogół bez kłopotów) dołączony sygnał dynamiczny z czujnika prądu (cewka Rogowskiego lub czujnik Halla), zainstalowanego na przewodzie łączącym SGS<sup>14</sup> z korpusem silnika. Zauważmy, że krzywa niebieska na rys. 20 jest podobna do typowej krzywej drganiowej charakteryzującej odpowiedź rezonansową jakiejś struktury mechanicznej na wymuszenie impulsowe. Tak więc akwizycja sygnału prądowego przez system diagnostyki i wykonanie pomiarów dla tego



Rys. 21. Minimalizacja prądów pasożytniczych przez zastosowanie izolacji

impulsu nie powinny nastęrczać żadnych trudności.

### 13. Przeciwdziałanie prądom łożyskowym na silniku

W przypadku potencjalnego zagrożenia wystąpieniem prądów pasożytniczych winny być stosowane rozwiązania zapobiegające ich negatywnym skutkom.

Prewencja winna być ukierunkowana na zapobieganie gromadzeniu się ładunków na wirniku oraz zapewnienie takiego przepływu ładunku między wirnikiem a korpusem silnika, który by minimalizował możliwość wystąpienia prądów łożyskowych.

Stosowane są różne metody zapobiegające prądom łożyskowym bezpośrednio na silniku i poza nim. Najczęściej wykorzystywane to:

- wprowadzanie w konstrukcji izolacji, która winna uniemożliwiać przepływy prądów pasożytniczych [9];
- zastosowanie jakiegoś rozwiązania SGS, czyli bezpośredniego uziemienia wału silnika;
- zastosowanie filtrów zewnętrznych między VFD a silnikiem;
- zastosowanie falownika wielopoziomowego<sup>15</sup>.

Na rys. 21 pokazano kilka miejsc, w których może być zastosowana izolacja celem zapobiegania przepływowi prądów pasożytniczych: (A) osadzenie łożyska na wale z zastosowaniem izolacji; (B) osadzenie łożyska w obudowie z zastosowaniem izolacji; (C) zastosowanie łożysk z tocznymi elementami ceramicznymi; (D) zastosowanie sprzęgieł izolowanych zapobiegających przepływowi prądów pasożytniczych między kolejnymi wirnikami<sup>16</sup>.

W większości sytuacji wystarczające jest zaizolowanie pojedynczego węzła łożyskowego. Natomiast w przypadku, kiedy zadanie dotyczy silnika dużej mocy, który posiada

niezależne i niezwiązane konstrukcyjnie z korpusem stojaki łożyskowe, izolacja winna być wykonana dla każdego łożyska [9].

Należy wziąć pod uwagę, że czasami indukowane przez VFD prądy o wysokiej częstotliwości przechodzą przez warstwę izolacyjną (podobnie jak dla prądu zmiennego nie jest problemem „przepływać” przez kondensator) i powodują uszkodzenie łożyska. Przepływ prądu może także mieć miejsce w przypadku takiego zabrudzenia łożyska, że popłynie on przez warstwę brudu obok konstrukcyjnej izolacji elektrycznej.

Dobrze pamiętać, że każde rozwiązanie mające na celu izolację będzie powodować poszukiwanie przez prąd alternatywnej drogi do ziemi.

Jako SGS są wykorzystywane dwa rozwiązania:

#### I. SZCZOTKI PUNKTOWE

Uziemienie wału poprzez zainstalowanie szczotki uziemiającej po stronie napędowej lub przeciw napędowej silnika z napędem VFD zapewnia alternatywną ścieżkę o niskiej impedancji z wału silnika do jego obudowy; ta metoda nie zapobiega pojawianiu się napięć wałowych, natomiast przeciwdziała gromadzeniu się ładunków na wale i w konsekwencji minimalizuje możliwość pojawienia się prądów łożyskowych; w celu uziemienia stosowane są węglowe szczotki uziemiające (najlepiej tzw. bezobsługowe); szczotki wykonywane są z różnych materiałów, natomiast te uznawane za najlepsze wykonane są z grafitu i srebra; na rynku można także znaleźć tańsze rozwiązanie wykorzystujące miedź zamiast srebra; o jakości szczotki wraz z jej uchwytem decyduje pewność ciągłego i wystarczająco dobrego kontaktu z wałem, niska oporność, długa żywotność; np. szczotki z uchwytemi oferowane przez firmę Helwig Carbon zostały przetestowane w warunkach

Tabela 2

Sterowanie:	Bez VFD	Poprzez VFD		
Moc i napięcie zasilania silnika:	napięcie >500 VAC	do 75 kW niskie napięcie	od 75 kW do 375 kW napięcie, 600 VAC	powyżej 375 kW napięcie > 600 VAC
Rodzaj prądów pasożytniczych:	zgodny z częstotliwością sieci	pojemnościowy	pojemnościowy, indukowany pojemnościowo	pojemnościowy, indukowany pojemnościowo, zgodny z częstotliwością sieci
Izolowanie łożysk w węzłach zintegrowanych z korpusem:	izolowane jedno łożysko – typowo NDE	niepotrzebne	izolowane jedno łożysko – typowo NDE	izolowane jedno łożysko – typowo NDE
Izolowanie łożysk w niezależnych kołach łożyskowych	izolowane oba łożyska	nie dotyczy	nie dotyczy	izolowane obydwa łożyska
Wykorzystywanie SGS w węzłach zintegrowanych z korpusem	TAK – typowo po stronie przeciwnej niż zastosowane łożysko izolowane (na ogół DE)	TAK po stronie DE lub NDE	TAK – typowo po stronie przeciwnej niż zastosowane łożysko izolowane (na ogół DE)	TAK – typowo po stronie przeciwnej niż zastosowane łożysko izolowane (na ogół DE)
Wykorzystywanie SGS w niezależnych kołach łożyskowych	SGS wykorzystywany w każdym węźle łożyskowym	nie dotyczy	nie dotyczy	SGS wykorzystywany w każdym węźle łożyskowym

połowych i wykazano, że w przypadku wirników obracających się ze średnią prędkością obrotową bliską połowie częstotliwości sieci działają efektywnie nawet przez 10 lat, tzn. zapobiegają erozji elektrycznej łożysk przez cały czas pracy; na rys. 22 pokazano ilustrację takiego rozwiązania opracowanego przez WWW.SHAFTGROUNDINGSYSTEMS.COM, kolejno pokazano aplikacje na silniku (A) od strony napędowej oraz od strony przeciwnapędowej dla silnika poziomego (B) oraz agregatu pionowego (C).

Szczotki działają punktowo. Najczęściej wykorzystywana jest pojedyncza szczotka, a czasami, w przypadku silników o wyższej mocy, bywa, że są stosowane dwie. Szczotki mogą stwarzać kilka problemów:

- a) są narażone na zużycie z powodu mechanicznego kontaktu z wałem;
- b) gromadzą zanieczyszczenia w miejscu kontaktu z wałem, co obniża jakość kontaktu i w konsekwencji zmniejsza skuteczność działania;
- c) ich powierzchnia może podlegać utlenianiu, co zmniejsza skuteczność uziemienia;
- d) wymagają mniej lub bardziej częstej konserwacji w zależności od jakości SGS i warunków środowiskowych aplikacji.

Jednym z problemów dotyczących szczotek jest ich zużywanie się, które jest tym bardziej intensywne im, wyższa jest prędkość liniowa powierzchni wału pozostająca w kontakcie



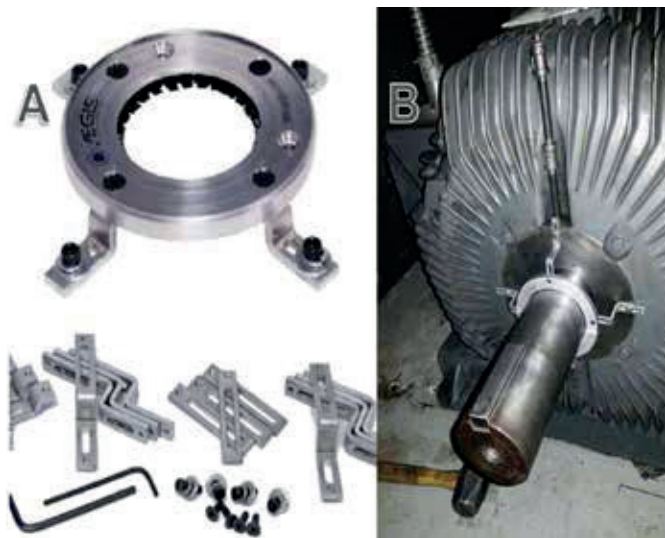
Rys. 22. Przykłady zastosowania szczotek zapobiegających erozji elektrycznej przez prądy łożyskowe

ze szczotką. W przypadku szczotek, które są zainstalowane na kierunku promieniowym (tak jak pokazano na rys. 22 A oraz podobnie w przypadku pierścieni – *vide*: rys. 23 B) prędkość ta zależy od średnicy wału. Dążąc do spowolnienia zużycia, niektóre firmy zalecają instalację szczotkowego SGS na kierunku osiowym wału silnika po jego stronie nienapędowej (*vide*: rys. 22 B i C). Centralnie współpracująca z wałem szczotka charakteryzuje się najmniejszą prędkością ruchu względnego.

Czasami zamiast szczotek wykorzystywane są taśmy z plecionki miedzianej, które dla zapewnienia wystarczająco dobrego kontaktu bywają doposażone w sprężynę lub odważnik.

## II. PIERŚCIENIE UZIEMIĄJĄCE

O ile powyżej omówione szczotki działają punktowo, to pierścienie uziemiające kontaktują się z wałem obwodowo z pomocą mikrowłókien w bardzo dużej liczbie punktów; przez wiele lat jedynym oferentem takiego wyrobu była firma AEGIS [6], której pierścienie (czy to w wersji monolitycznej, czy też dzielonej) są wykorzystywane przede wszystkim na silnikach napędzających maszyny robocze; na rys. 23 A pokazano zestaw instalacyjny umożliwiający utwierdzenie pierścienia monolitycznego AEGIS na silniku, a na 23 B tenże, ale już po zainstalowaniu na silniku; w maju 2021 roku na rynku pojawiła się z podobnym produktem firma KACO, której pierścienie są pierwszoplanowo dedykowane systemom elektrycznym wykorzystywanym w napędach pojazdów.



Rys. 23. Pierścień uziemiający przed (A) i po zainstalowaniu na silniku (B)

Producenci pierścieni, podobnie do producentów szczotek, także chwalą się długą żywotnością swoich produktów. I tak firma AEGIS podaje, że w ciągu 10 000 godzin testowania następuje zużycie mikrowłókien na długości 25  $\mu\text{m}$ , co pozwala jej stwierdzić, że pierścień będzie efektywnie działał przy ciągłej pracy silnika przez ponad 20 lat. Problem żywotności nie jest jednak tak oczywisty. Firma AEGIS zaleca przygotowanie na wale ścieżki, z którą będą współpracować włókna pierścienia. W ramach przygotowania powierzchnia na wale współpracująca z pierścieniem winna być oczyszczona aż do surowego metalu, a celem polepszenia jakości współpracy można ją dodatkowo powlec

koloidalnym srebrem. Oznacza to, że w przypadku środowiska, w którym występuje atmosfera znacznego zakurzenia i brudu, efektywność tej współpracy może się obniżyć, a żywotność skracać. Zauważmy dodatkowo, że producenci silników, którzy instalują pierścienie już na etapie produkcji, czynią to zazwyczaj nie po zewnętrznej stronie węzła łożyskowego (tak jak to pokazano na rys. 23 B), ale po stronie przeciwnej, tzn. wewnątrz silnika, gdzie możliwość pogorszenia jakości powierzchni (np. z powodu pojawienia się brudu), z którą współpracują włókna, jest zdecydowanie mniejsza.

Dokonując analizy miejsca, w którym mógłby być zainstalowany SGS, należy rozważyć możliwość pojawienia się w tym rejonie przedmuchów (np. pary) lub przecieków (np. oleju). Wymienione mogą przyczynić się do zmniejszenia efektywności działania SGS-u.

Historycznie miało miejsce jeszcze jedno rozwiązanie, zupełnie przeciwne do wprowadzania izolacji. Bazowało ono na zastosowaniu smarów (wysoko-)przewodzących. Teoretycznie, ponieważ smar ten zawiera cząstki przewodzące, zapewniałby ścieżkę o niższej impedancji bezpośrednio przez łożysko i odprowadzał prąd z wału przez łożysko bez uszkodzenia wyładowaniem. Niestety, przewodzące cząstki w takich środkach smarnych zwiększają zużycie mechaniczne łożyska, czyniąc środek smarny mniej skutecznym na kierunku jego podstawowego działania i doprowadzając tym samym do szybszych awarii łożysk. Tak więc metoda ta została zarzucona jako możliwość rozwiązania problemu z prądami łożyskowymi.

W tabeli 2 scharakteryzowano, jakie środki zapobiegające pojawianiu się prądów łożyskowych winny być stosowane dla zróżnicowanego sposobu zasilania silników oraz w przypadku ich mniejszej lub większej mocy.

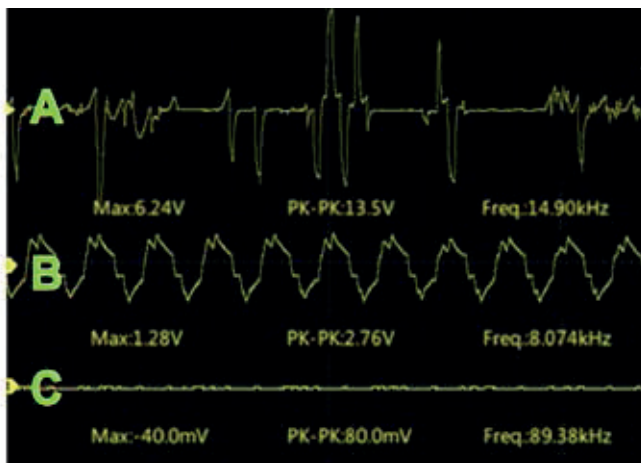
Podjmując decyzję o stosowaniu któregoś z rozwiązań w celu zmniejszenia awaryjności agregatów z napędem VFD powodowanej przez prądy łożyskowe, należy wziąć pod uwagę:

- przedział zmienności temperatury, w której rozważane rozwiązanie może być wykorzystywane;
- możliwość obsługi instalowanego SGS w warunkach pracy agregatu;
- potrzebę zapewnienia szczelności i czystości przestrzeni, w której funkcjonuje SGS;
- w przypadku silników z certyfikacją Ex dopuszczone jest tylko stosowanie pierścieni uziemiających, które winny być instalowane wewnątrz silnika; w przypadku nowych zamówień instalacja pierścienia winna być zrobiona przez producenta silnika; jeśli decyzja o instalacji SGS zapada dla silnika już używanego, to wymaga się, aby była ona przeprowadzona przez serwis posiadający na taką okoliczność autoryzację;
- producenci obu rodzajów SGS prezentują dokumenty o wyższości ich rozwiązania nad rozwiązaniem konkurencyjnym; na rys. 24 pokazano sygnały czasowe napięć wałowych<sup>17</sup>:
  - A. dla którego wartość międzyszczytowa wynosi 13,50 V;
  - B. dla tego samego przypadku, ale po zastosowaniu pierścienia AEGIS; w tym przypadku wartość międzyszczytowa wynosi 2,76 V czyli ~20,4% stanu oryginalnego;
  - C. dla tego samego przypadku, ale po zastosowaniu szczotek firmy HELWIG CARBON; w tym przypadku wartość międzyszczytowa wynosi 0,08 V, czyli ~0,006% stanu oryginalnego.

## 14. Gdzie mogą wystąpić problemy

### Silniki elektryczne | generatory

Czasami rozpoznawane są problemy z podłączeniem kabli do maszyny elektrycznej. Problemy na podłączeniu mogą być konsekwencją drgań mechanicznych skutkujących poluzowaniem połączenia, co wpływa na zmianę oporności fazy; czasami podłączenie to jest zrealizowane z pomocą szyn, które podlegają drganiom rezonansowym prowadzącym do ich pęknięcia.



Rys. 24. Przykład napięć wałowych (A) oraz ich redukcji z pomocą (B) pierścienia uziemiającego i (C) szczotek uziemiających

### Turbina

Ładunki statyczne na wirniku turbiny są wytwarzane przede wszystkim przez zawilgoconą parę zsuwającą się z łopatek ostatnich stopni. Ładunki zgromadzone na wirniku starają się z niego ująć i poszukują w tym celu drogi o najmniejszej oporności. Może to mieć miejsce w łożysku oporowym, w łożyskach łożysk poprzecznych (lub w ich bezpośredniej bliskości), w uszczelnieniach. Po nagromadzeniu się odpowiednio dużego ładunku dochodzi do punktowego wyładowania.

Natomiast dobrze jest pamiętać, że w systemie wirnikowym znajduje się również lokalnie magnetyzm rezydualny, a więc w wirniku mogą się generować także ładunki za przyczyną elektromagnetyzmu.

W konsekwencji pojawiają się prądy łożyskowe, które niszczą łożyska, lub prądy okołłożyskowe, które mogą zakłócać działanie pomiarów włączonych do systemu zabezpieczenia drgań turbozespołów, co zostanie pokazane dalej.

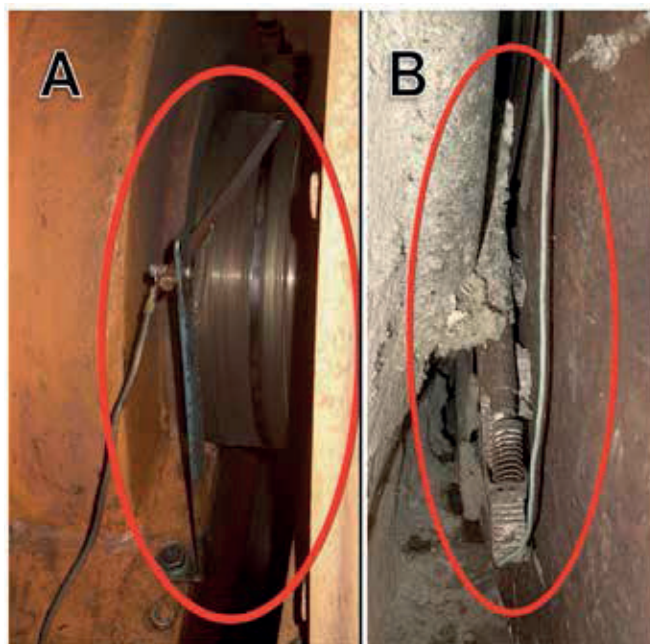
Przeciwdziałając zagrożeniu gromadzenia się ładunku statycznego w kondensacyjnych turbinach parowych, norma API 612 (2005) stwierdza, że dla wirników winny być instalowane SGS. Tak więc turbiny typowo posiadają uziemienie wirnika/wirników. Natomiast nie w każdym przypadku służby UR podchodzą do takiego uziemienia wystarczająco poważnie. Na rys. 25 pokazano dwa przykłady mało profesjonalnego podejścia do uziemienia wirnika turbiny.

Nie jest wystarczające poprawne zainstalowanie na turbinie SGS, ale wymagane jest także poprawne podłączenie w systemie jego kabla. Znane są przypadki, że chcąc to zrobić możliwie najlepiej, załoga starała się podłączyć koniec przewodu SGS do gwarantowanego, bardzo dobrego uziemienia. Jest to błąd,

bowiem celem SGS jest wyrównanie napięć między wirnikiem a korpusem maszyny. Tak więc SGS winien być podłączony do korpusu, a ten dopiero następnie do wystarczająco dobrego uziemienia.

### Turbina – sprężarka – generator

Opisany wcześniej sposób wykonywania pomiarów z pomocą sprzętu przenośnego nie powinien być realizowany dla maszyn dużej mocy. Maszyny te mają typowo izolowane łożyska/stojaki łożyskowe. Znany jest przypadek próby zrealizowania takiego pomiaru przy pomocy sprzętu przenośnego, przy którym posługiwano się szczotkami z przewodami 18AWG. Pomiar trwał bardzo krótko, bowiem po przyłożeniu szczotek do wału przewód wyparował, a ręczny multimetr zdążył zarejestrować: ~40 V i ~150 A.



Rys. 25. Przykłady mało starannego podejścia do uziemienia wirników turbiny

Znany jest przypadek agregatu (turbina – izolowane sprzęgło – przekładnia – kolejne izolowane sprzęgło – wielostopniowa sprężarka – generator z bezstopniową wzbudnicą), w którym po uruchomieniu zaczęły wzrastać poziomy drgań, co doprowadziło do jego odstawienia po ~6 miesiącach. W czasie przeglądu stwierdzono zaszczerzenie łożysk turbiny. Po ponownym uruchomieniu rozpoznano gwałtowne pogorszenie jakości pracy układu uziemiającego wał (do czego była wykorzystywana szczotka z mikrowłóknami) bowiem, nie było możliwe utrzymanie napięć wałowych w pobliżu 0 V. Po wspomoczeniu uziemienia wału poprzez zainstalowanie dodatkowej taśmy miedzianej uzyskano spadek napięć wałowych do poziomu ~0,01 V.

### Przekładnia zębata

Z częstotliwością raz na kilka tygodni łożysko czopa wału zębniaka przekładni ulegało uszkodzeniu. Została zidentyfikowana jego ewidentna erozja elektryczna. Fakt, że systematycznie tylko to jedno łożysko się uszkadzało, został wytłumaczony jego największym przeciążeniem i w konsekwencji najcieńszą warstwą filmu olejowego (co skutkowało najmniejszą impedancją).

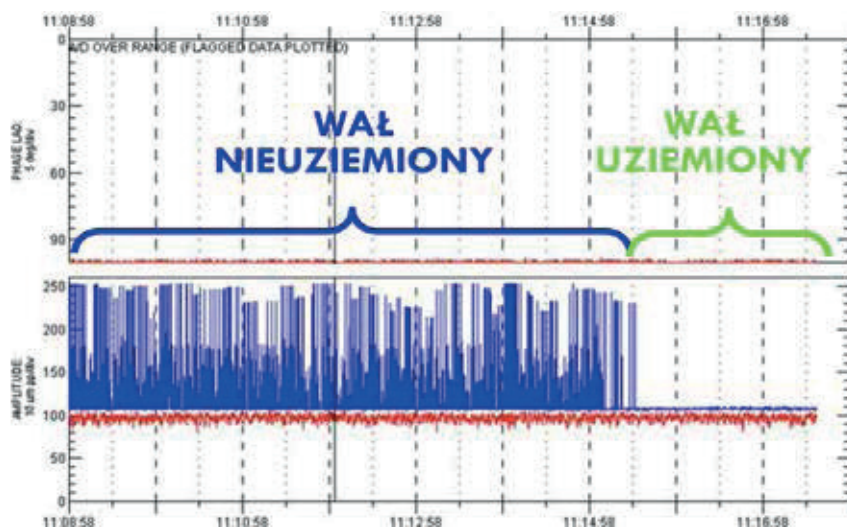
Ocena stopnia przeciążenia poszczególnych łożysk była możliwa dzięki posiadanym bezkontaktowym pomiarom drgań XY w każdym węźle łożyskowym przekładni.

Doświadczeni producenci przekładni zabiegają o łączenie przekładni z kolejnymi wirnikami z pomocą sprzęgieł izolowanych.

#### Pompa

Pompa o mocy ~3,5 kW pracowała w rafinerii szereg lat i uległa uszkodzeniu. Naprawy wymagały zarówno wirnik, jak i obudowa. Uszkodziły się

one wtórnie po pierwotnym uszkodzeniu łożysk. Po naprawie agregat został ponownie uruchomiony, przepracował ~9 miesięcy i z powodu osiągnięcia złego stanu technicznego po raz kolejny został odesłany do remontu. Po ponownym uruchomieniu sytuacja powtórzyła się po kolejnych ~6 miesiącach. Tym razem użytkownik podszedł bardziej poważnie do problemu i przeprowadził rozpoznanie natury uszkodzenia łożysk. Z pomocą mikroskopu, wykorzystując powiększenie 30x, rozpoznano charakterystyczne robaki elektroerozyjne.



Rys. 26. Przykład drastycznego zaszumienia bezkontaktowych pomiarów drgań

Mając takie rozpoznanie (+ spostrzeżenie o skracającym się czasie międzyawaryjnym, co mogło być powodowane przez wzrastający poziom magnetyzmu rezydualnego), dokonano pełnego demontażu pompy oraz rozmagnesowania jej namagnesowanych komponentów. Od czasu tego ostatniego remontu pompa przepracowała już blisko 5 lat bezawaryjnie.

#### Napędy AC

Zastosowanie izolowanych sprzęgieł winno być poważnie brane pod uwagę w przypadku każdego silnika zasilanego z VFD, a także w przypadku każdego innego urządzenia, na którym może dochodzić do generowania napięć wałowych.

Znane są liczne przypadki sytuacji, w których użytkownicy końcowi mimo zainstalowania na wale silnika SGS nie uniknęli problemów z erozją elektryczną kolejnych łożysk agregatu w sytuacji, w której kolejne wirniki były

zasprężone z pomocą nieizolowanych sprzęgieł. Natomiast nie wiadomo czy SGS został zainstalowany prawidłowo lub czy działał prawidłowo. O prawidłowości działania może informować pomiar prądu na doziemiającym przewodzie SGS.

#### Napędy DC

Maszyny prądu stałego mogą mieć wpływ prądu na wał z uzwojeń twornika. Również w tym przypadku prądy spowodowane napięciem na wale mogą powodować pogorszenie stanu łożysk silnika.

#### Na wodzie

Korozja powodowana przez prądy błędne jest powszechnym problemem w marinach lub portach, w których cumuje duża liczba statków. Łódź mająca złe połączenia elektryczne może odprowadzać prąd stały z akumulatorów bezpośrednio do wody. Inne łodzie podłączone do systemu elektrycznego mariny mają wspólne okablowanie,

a prąd błędzący może przedostać się do innych łożdzi przez podwodne okucia lub wały napędowe śrub. Z powodu przepływu prądu elektrycznego w uszkodzonym systemie łożdzi może wystąpić przyspieszona korozja, która może doprowadzić do szybkiego zniszczenia metalowych okuć.

### 15. Kiedy dochodzi do pojawienia się prądów pasożytniczych

Przepływ prądu prowadzący do uszkodzenia łożyska może mieć miejsce tylko w jednym lub w kilku z niżej wymienionych reżimów pracy maszyny:

- na niepracującej maszynie;
- na maszynie znajdującej się w przejściowych warunkach roboczych (rozruch lub odstawianie);
- na maszynie w nominalnych warunkach roboczych, ale pod jakimś szczególnym obciążeniem.

Np. w przypadku maszyn łożyskowych ślizgowo może on mieć miejsce: (I) w początkowej fazie rozruchu, kiedy to jeszcze nie jest zbudowany wystarczająco gruby (tzn. o wystarczającej impedancji) film olejowy, (II) przy zaistnieniu szczególnych warunków procesowych, w których nastąpi takie przeciążenie łożyska, że grubość filmu olejowego w łożysku ślizgowym lub smaru między elementami tocznymi a bieżniami w łożysku tocznym nie zapewnia impedancji uniemożliwiającej przepływ prądów łożyskowych.

W różnych warunkach pracy maszyny (tzn. przy różnych obciążeniach) może dochodzić do zmiany węzła maszyny, w którym następuje przepływ prądu pasożytniczego.

### 16. Wpływ na MMS

Łuk elektryczny (podobnie jak wyładowania atmosferyczne) skutkuje generowaniem fal elektromagnetycznych o wysokiej częstotliwości. Jeśli pojawia się niedaleko od wiropędowych sond mierzących drgania wirnika, to może spowodować drastyczne pogorszenie pomiarów, a nawet całkowicie je uniemożliwić. Na rys. 26 pokazano przykład zróżnicowania pomiaru drgań przed i po podłączeniu SGS. Bez podłączonego SGS, tzn. w pierwszej części wykresu, poziom zaszumienia jest tak duży, że całkowicie

uniemożliwia realizację pomiaru. Po podłączeniu szczotki uziemiającej wirnik – zaszumienie powodowane przez prąd pasożytniczy całkowicie znika.

Przypadki takich wyładowań, całkowicie uniemożliwiających pomiar były, również rozpoznane na niektórych maszynach krytycznych w Polsce.

### 17. Monitorowanie dedykowane

Od wielu lat na rynku są dostępne systemy monitorowania dedykowane rozpoznawaniu prądów błędzących<sup>18</sup>. Natomiast w każdym przypadku, w którym maszyna jest wyposażona w system monitorowania drgań, jest możliwość łatwego i taniego wdrożenia monitorowania aktywności takich prądów bezpośrednio do tego systemu.

Tak jak wspomniano wcześniej, prądy błędzące nie muszą być zjawiskiem ciągłym w czasie. Wtedy, kiedy pojawiają się w jakichś określonych warunkach pracy agregatu, jest je zdecydowanie łatwiej zidentyfikować, mając ich monitoring zrealizowany w jednym zintegrowanym systemie monitorowania stanu technicznego (MMS) agregatu.

### 18. Zakończenie

W artykule opisano problemy techniczne powodowane przez prądy błędzące. Skoncentrowano się głównie na maszynach wirnikowych. W każdym przypadku ich zaistnienie przyczynia się do skrócenia czasu międzyremontowego, a więc prowadzi do pogorszenia wyniku finansowego działania przedsiębiorstwa. W krajowych przedsiębiorstwach nie ma na ogół procedur wymuszających kontrolę zagrożenia dla maszyn z napędem VFD dostarczanych w ramach nowych inwestycji ani tym bardziej dla maszyn modernizowanych, które w przeszłości pracowały jako stałobrotowe, a współcześnie są modernizowane przez dodanie VFD.

Zarówno służby UR, jak i służby diagnostyki są słabo przygotowane do wiarygodnego rozpoznawania możliwości wystąpienia uszkodzenia w konsekwencji prądów błędzących, jednoznacznego identyfikowania uszkodzeń, które są przez nie spowodowane, a tym bardziej do zapobiegania takim uszkodzeniom.

Zapobieganie pojawianiu się prądów

pasożytniczych winno być realizowane przez stosowanie rozwiązania SGS, które jest dedykowane temu zadaniu. Znane są przypadki zastosowania w tym celu mało profesjonalnych rozwiązań (przypadkowe szczotki niedające dobrego kontaktu z wałem, szybko zużywające się, zainstalowane w sposób, który nie zapewnia w długim czasie równomiernego i optymalnego nacisku na wał<sup>19</sup>), które nie powodowały radykalnej poprawy sytuacji.

W przypadku maszyn o dużym znaczeniu dla procesu produkcyjnego winno być realizowane monitorowanie napięć/prądów wałowych, bowiem umożliwia ono rozpoznawanie problemu w jego początkowej fazie i w konsekwencji umożliwia całkowicie zapobieganie awariom mechanicznym powodowanym przez erozję elektryczną.

### Literatura

[1] NIPPES P.I., GALANO E.S., *Understanding shaft voltage and grounding currents of turbine generators*. MPS Magnetic Products and Services, Inc., [www.gaussbusters.com](http://www.gaussbusters.com).

[2] *Understanding Oil's Dielectricity*, Noria Corporation, [www.machinerylubrication.com](http://www.machinerylubrication.com).

[3] VANCE, J.M.; PALAZZOLO, A.B.; Zeidan, Fouad Y., *Electric Shaft Currents In Turbomachinery*, Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, 1987.

[4] API STD 612 *Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries Steam Turbines Special-purpose Applications*, 8th Edition, November 2020, American Petroleum Institute (API).

[5] *Inverter-Driven Induction Motors Shaft and Bearing Current Solutions*, Rockwell Automation, Industry White Paper,

[6] *How to Protect Bearings in Inverter-Duty Motors*, DESIGN WORLD, 4 OCT 2012, [www.designworldonline.com](http://www.designworldonline.com).

[7] NOWICKI R., *Thrust Bearing Position Monitoring*, ORBIT, Vol. 31, No. 1, 2011, p. 52–59.

[8] *Why We Test For Shaft Voltage (And You Should, Too!)*, [www.helwig-carbon.com](http://www.helwig-carbon.com).

[9] HAN P., HEINS G., PATTERSON D., THIELE M., IONEL D.M., *Evaluation of bearing voltage reduction in electric machines by using insulated shaft and*



bearings, 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit MI, Oct. 11–15, 2020.

### Przypisy

- [1] Prąd telluryczny, zwany także „prądem ziemskim”, jest prądem elektrycznym przepływającym po powierzchni i pod powierzchnią Ziemi, w kierunku do niej równoległym. Prądy te powstają w wyniku przemieszczania się ładunków w celu osiągnięcia równowagi między regionami o różnych potencjałach elektrycznych, do czego przyczyniają się m.in. fale elektromagnetyczne o bardzo niskiej częstotliwości, pochodzące z kosmosu i wpływające na zmianę ziemskiego pola magnetycznego (np. w wyniku aktywności plam słonecznych).
- [2] Współczesne generatory statyczne wysokiego napięcia, zwane generatorami Van de Graaffa, mogą generować różnice potencjałów dochodzące nawet do 20 MV.
- [3] W roku 1840 miało miejsce zdarzenie zwane „incydentem w Seghill”: z kotła parowego przez cementową uszczelkę wokół zaworu bezpieczeństwa wypływała para; kiedy robotnik, trzymając jedną rękę na dźwigni zaworu, drugą zbliżył do strumienia pary, nastąpił przeskok iskry elektrycznej i został on porażony prądem. Znane są listy, w których Lord William G. Armstrong donosi Faradayowi o tym zdarzeniu i o rozpoznaniu zjawiska elektryczności parowej. W odpowiedzi dostał informację, że efekt został przez Faradaya zbadany przy pomocy elektrometru i stwierdził on, że para jest naładowana dodatnio.
- [4] Magnetyzm szczątkowy (zwany też czasem magnetyzmem rezydualnym lub remanencją) jest definiowany jako wielkość namagnesowania pozostała w ciele, które nie jest już pod wpływem oddziaływania magnetycznego powodowanego przez czynniki zewnętrzne.
- [5] W piśmiennictwie polskim jednostka ta (pochodząca od nazwiska fizyka Carla Gaussa) bywa także pisana przez pojedyncze „s”. Tutaj, tak jak to ma miejsce w piśmiennictwie zachodnim, zachowuje się pisownię z podwójnym „s”.
- [6] Poziom pola spowodowany magnetyzmem szczątkowym w nowych maszynach wirnikowych jest konsekwencją: (i) stosowanej technologii produkcji, (ii) stosowanych technik testowania elementów maszyn, a także (iii) przypadkowymi wpływami środowiskowymi. Może się on zawierać w przedziale od dwóch do kilku tysięcy Gaussów. Poziom pola zwiększa się znacznie w zmontowanej maszynie, w której materiał magnetyczny zapewnia dobrą zamkniętą ścieżkę dla magnetyzmu, a szczeliny powietrzne między częściami są niewielkie. Gęstość pola magnetycznego w szczelinie powietrznej silników i generatorów mieści się w zakresie od 7000 do 9000 Gaussów. Pola te są w stanie generować od watów do megawatów energii elektrycznej, w zależności od mocy generatora. Wymienione przyczyny mogą stworzyć warunki do generowania znacznych napięć błądzących i cyrkulacji prądów niszczących.
- [7] Standard [4] ←API670 określa namagnesowanie w jednostkach typowych dla układu CGS, czyli w GAUSSACH, której to jednostki skrótem jest [Gs]

# reklama

lub krótko [G]. Jednostka ta przejściowo była dopuszczona do stosowania w układzie SI. Jednak ze względu na fakt, że w układzie SI G jest przedrostkiem dla giga ( $=10^9$ ) i Gs winno być interpretowane jako gigasekunda zrezygnowano z jej stosowania na rzecz Tesli [T]. Trudno się w tej argumentacji dopatrzeć racjonalności bowiem w układzie SI T jest także skrótem dla tera:  $10^{12}$ . Przelicznik między jednostkami namagnesowania:  $1\text{GAUSS}=10^{-4}\text{TESLA}=100\mu\text{T}$ .

- [8] W piśmiennictwie angielskojęzycznym nosi ono nazwę *Common Mode Voltage* i bywa opisywane jako  $V_{\text{CM}}$ .
- [9] PWM = *Pulse Width Modulation*, czyli modulacja szerokości impulsu (PWM), to technika, która zmieniła świat, zmniejszając zużycie energii przez urządzenia, bowiem umożliwia płynne sterowanie wielu różnych procesów. Jest wykorzystywana nie tylko w przemyśle, bowiem także w gospodarstwach domowych stosowane są coraz częściej inwerterowe lodówki, pralki, pompy ciepła, klimatyzatory etc. PWM jest także wykorzystywana do sterowania mocą cieplną grzejników, ściemniaczy LED, jasności ekranów komputerowych.
- [10] W pewnym dużym przedsiębiorstwie występują permanentnie problemy z implementacją systemów monitorowania drgań online, bowiem dla wielu aplikacji VFD nie zostały zastosowane kable zasilające spełniające opisane wymagania. W konsekwencji wysoka koncentracja szumu E-M w otoczeniu maszyn z napędami VFD wpływała negatywnie na sygnały drgań generowane przez zainstalowane na nich czujniki drgań oraz ich transmisję do systemów monitorowania poprzez znaczące pogorszenie stosunku sygnału do sumarycznego szumu.
- [11] Zazwyczaj w przypadku maszyn łożyskowych ślizgowo minimalna grubość filmu olejowego znajduje się po aktywnej stronie łożyska oporowego. Natomiast sytuacja taka nie musi mieć miejsca dla pełnego zakresu obciążeń roboczych maszyny.
- [12] Norma NEMA MG1 identyfikuje międzyszczytowe napięcia pojemnościowe wału w przedziale  $20 \dots 80 V_{\text{PEAK-PEAK}}$  jako takie, których przekroczenie może już spowodować wyładowania elektryczne w łożyskach silnika. Stwierdzenie to jest prawdziwe przy założeniu, że w łożysku zachowane są poprawne warunki smarowania. Wtedy, kiedy smaru jest za mało lub przeciążenia promieniowe doprowadzą do znaczącego pocienienia filmu olejowego, elektroerozja wystąpi także za przyczyną napięć niższych od  $20 V_{\text{PEAK}}$ .
- [13] To się rzadko zdarza, aby na nowo wdrożonych agregatach z napędem VFD pojawiały się jakieś problemy spowodowane przez prądy pasożytnicze. Problemy powodowane przez te prądy pojawiają się po kilku latach od uruchomienia, najczęściej po przeprowadzeniu od 6 do 12 lat (tzn. najczęściej już po wygaśnięciu gwarancji). Świadomość powyższego winna wpływać na taką redakcję SIWZ-ów, aby po pierwsze, agregat był tak skonstruowany, że wpływ prądów łożyskowych na jego awaryjność nie zaskoczy użytkownika przedwcześnie, po drugie, winno być sformułowane wymaganie co do obligacyjnej dostawy agregatu z jakimś SGS i po trzecie, jeśli zagrożenie wystąpienia napięć wałowych jest duże, a agregat jest klasyfikowany jako krytyczny lub semikrytyczny, to dobrze jest wymagać jego wyposażenia w monitoring umożliwiający rozpoznanie prądów pasożytniczych.
- [14] SGS = *Shaft Grounding System* czyli system uziemienia wału.
- [15] W roku 1975 po raz pierwszy zastosowano inwerter 2-poziomowy. Współcześnie wykorzystywane są 3 – i więcejpoziomowe. Inwertery takie radykalnie przyczyniają się do obniżenia przepięć pojawiających się w silniku za przyczyną jego zasilania.
- [16] Zagranicznej firmie EPC, która realizuje w Polsce dużą inwestycję ze znaczną liczbą agregatów z napędami VFD, zostały zadane dwa pytania: (I) w jaki sposób są zabezpieczone agregaty z napędami VFD przed wystąpieniem prądów łożyskowych? oraz (II) czy w agregatach tych zastosowano sprzęgła izolowane? EPC udzieliła odpowiedzi: (Ad I) zastosowano łożyska izolowane, (Ad II) nie zastosowano sprzęgieł izolowanych. Pytanie retoryczne: czy zastosowanie izolacji łożysk silników oraz użycie nieizolowanych sprzęgieł jest równoznaczne z brakiem problemów powodowanych przez prądy łożyskowe na maszynach roboczych napędzanych przez te silniki?
- [17] Prezentowane pomiary zostały dokonane przez producenta silników jako sprawdzające efektywność działania SGS przed dokonaniem wyboru preferowanego rozwiązania.
- [18] Między innymi firma MSP oferuje takie monitory dla różnych aplikacji, w tym także z atestem Ex dla aplikacji w strefach zagrożenia wybuchowego.
- [19] Nacisk sprężyny na szczotkę węglową może mieć znaczący wpływ na jej żywotność i wydajność pracy. Nacisk zbyt duży będzie skutkował przyspieszonym i niepotrzebnym zużyciem ciernym, natomiast wraz ze spadkiem nacisku sprężyny wzrasta elektryczne zużycie szczotki, co także prowadzi do jej przyspieszonego zużycia. Bardzo słaba siła sprężyny może prowadzić do podskakiwania, tzn. odrywania się od powierzchni „jezdnej”, a w skrajnym przypadku do zawieszania się szczotki ponad tą powierzchnią, a więc może mieć miejsce selektywne w czasie działanie.

✉ Ryszard.Nowicki@vp.pl  
Tel. [+48] 601710700

reklama