

prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec, Katedra Elektrowni i Systemów Pomiarowych,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska

Monitoring stanu technicznego zespołów maszynowych w przemyśle i energetyce - doświadczenia własne

Bezpieczeństwo eksploatacji, dyspozycyjność oraz trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń wykorzystywanych w procesie produkcyjnym ma decydujący wpływ na kondycję ekonomiczną przedsiębiorstwa [4÷6, 8, 17, 18]. Znaczne straty produkcyjne mogą być skutkiem nieprzewidzianych awarii maszyn i urządzeń, a w konsekwencji postępu maszyn. Do tego dochodzą często bardzo kosztowne naprawy.

Konieczne jest dysponowanie informacjami na bieżąco o zmianach stanu dynamicznego maszyn, o stopniu zaawansowania ich zużycia, rodzaju i poziomie uszkodzeń, po to aby zapobiec nieprzewidzianym awariom i w miarę możliwości wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze. Prowadzenie eksploatacji maszyn w oparciu o ich obserwację przez obsługę jest niewystarczające. Diagnostyka maszyn oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwala uniknąć awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas eksploatacji maszyn. Organizacyjna i finansowa atrakcyjność diagnostyki zespołów maszynowych oraz ciągły postęp w elektronice i dostępność do niej, zachęcają do intensywnego stosowania diagnostyki maszyn [8, 17, 18].

■ Eksploatacja maszyn w przemyśle

W ujęciu ogólnym zespoły maszynowe można eksploatować na różne sposoby:

1. Eksploatacja do wystąpienia awarii.
2. Eksploatacja planowo-zapobiegawcza.
3. Eksploatacja zależna od stanu maszyn.
4. Eksploatacja będąca połączeniem planowo-zapobiegawczej i zależnej od stanu maszyn.

W metodzie eksploatacji maszyn zależnej od ich stanu technicznego, każdy zespół maszynowy traktowany jest w sposób indywidualny. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, tylko uwarunkowany stanem technicznym zespołu maszynowego. Remont przeprowadzamy tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne, określa się stan techniczny zespołu maszynowego, indywidualnie. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian (rys.1). Ocenę aktywności drganiowej zespołu maszynowego można wykonać w oparciu o stosowne obowiązujące normy lub w oparciu

o sprawdzone i zalecane kryteria [8, 17, 18]. Wyniki pomiarów drgań można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania zespołu maszynowego. Analizując wyniki pomiarów, obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny, można określić zakres remontu, przewidzieć i zaplanować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu. Spośród nowoczesnych metod badań diagnostycznych maszyn należy wyróżnić bardzo efektywne badania, opierające się na wykorzystaniu informacji zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn. Sygnałami tymi są między innymi sygnały wibroakustyczne, które towarzyszą każdemu procesowi wytwórczemu i eksploatacyjnemu [4÷6]. Informują one o procesach dynamicznych zachodzących w maszynach w zakresie drgań strukturalnych i zjawisk akustycznych, których zakres częstotliwości leży w granicach od ułamka Hz do kilkudziesięciu MHz. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia

się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian. Eksploatacja zespołów maszynowych zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowadzenia eksploatacji maszyn technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych i w energetyce. W gospodarce krajów zachodnich jest strategią dominującą. Strategia ta obok korzyści ekonomicznych wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [4-6, 8, 17, 18]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [18], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania. Autor stwierdza, że w krajowych zakładach przemysłowych przed przejściem z eksploatacji planowo-zapobiegawczej do eksploatacji zależnej od stanu maszyn bardzo często stosuje się formę pośrednią będącą połączeniem elementów wymienionych wyżej rodzajów eksploatacji. Jest to eksploatacja będąca połączeniem planowo-zapobiegawczej i zależnej od stanu maszyn.

Aby zmniejszyć awaryjność zespołów maszynowych w przedsiębiorstwach w zakresie stanów dynamicznych, ustalono warunki konieczne, jakie należy bezwzględnie przestrzegać dla zapewnienia należytego utrzymania ruchu zespołów maszynowych. Są to [8, 17, 18]:

- Udział zespołu diagnostycznego w odbiorach nowych maszyn.
- Silniki bezwzględnie przed oddaniem do eksploatacji należy sprawdzić w Stacji Prób i Pomiarów z właściwym wyposażeniem badawczym (fundament do badań, stanowisko, aparatura) tak pod względem elektrycznym, jak i dynamicznym oraz termicznym.
- Prawidłowy dobór silnika do wymagań napędzanego urządzenia oraz możliwości zasilania.

- Prawidłowy dobór łożysk w napędzie i w maszynie napędzanej.
- Prawidłowy dobór sprzęgła.
- Właściwie zaprojektowana i wykonana konstrukcja wsporcza, fundament z elementami do mocowania silnika i maszyny napędzanej, dbałość o ich stan techniczny.
- Napędy prawidłowo ustawione na konstrukcji wsporczej, fundamencie.
- Wszystkie maszyny ustawiane z uwzględnieniem poprawek cieplnych.
- Wszystkie wirniki wyważone z uwzględnieniem niewyważy cieplnej.
- Prawidłowe wyważanie wirnika zespołu: silnik + sprzęgło + maszyna napędzana.
- Stosowanie właściwej techniki smarowania łożysk w zespole maszyn.
- Dbłość o dobry stan izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych.
- Stosowanie pomiaru temperatury tam, gdzie jest to konieczne.
- Przestrzeganie zasad montażu i demontażu łożysk - podgrzewanie indukcyjne.
- Przeprowadzanie remontów tylko wtedy, gdy stan techniczny maszyny wskazuje na jego konieczność. Nie powinno się ingerować w sprawnie działającą maszynę. Zalecana jest strategia utrzymania

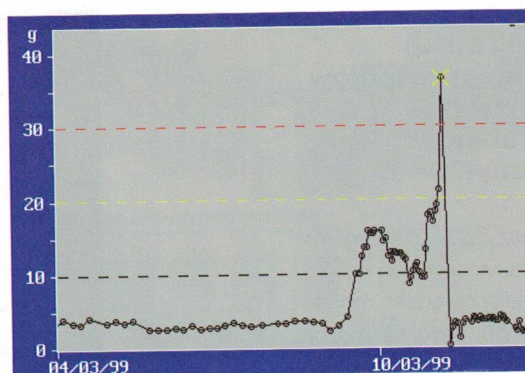
maszyn polegająca na eksploatacji zależnej od ich stanu technicznego.

Powyższe uwarunkowania mają jednakową wagę.

■ Systemy pomiarów diagnostycznych w zakresie stanów dynamicznych zespołów maszynowych

W zakładach przemysłowych najbardziej rozpowszechniony jest system okresowych pomiarów diagnostycznych zespołów maszynowych off-line i on-line prowadzonych cyklicznie wg harmonogramu, który obejmuje [8, 17, 18]:

- Pomiar drgań węzłów łożyskowych i całego zespołu maszynowego.
- Pomiar temperatury w węzłach łożyskowych.
- Ocenę stanu smarowania łożysk. Pomiar wykonują najczęściej specjaliści z wydziałów diagnostyki lub innych wydziałów utrzymania ruchu. W ocenie własnej najlepszymi metodami diagnozowania łożysk tocznych w warunkach krajowych są:
 - Metoda detekcji obwiedni, w tym metoda zmodyfikowana [17, 18].
 - Metoda SPM pod warunkiem specjalnego przygotowania punktu pomiarowego [17, 18].



Rys. 1. Wyniki pomiarów przyspieszenia drgań w monitoringu łożyska 6326 w przykładowym silniku idea diagnostyki drganiowej stanu technicznego łożyska tocznego w silniku [17, 18]

W krajach o bardzo wysokiej kulturze technicznej metody wymienione wyżej są uzupełniane metodami wysokoczęstotliwościowymi - SE, SEE, HFD, EA [17, 18]. W urządzeniach przemysłowych wyprodukowanych przez firmy amerykańskie można spotkać wyposażenie węzłów łożyskowych w czujniki drgań do metody REBAM. Wszystkie wymienione metody mogą być z dobrym skutkiem wykorzystane pod warunkiem właściwego przygotowania punktów pomiarowych. Zasady wykonywania pomiarów diagnostycznych oraz stosowne kryteria oceny stanu technicznego łożysk tocznych w oparciu o wymienione metody autor przedstawił w monografii [18]. Stosowanie tych metod wymaga posiadania sprzętu pomiarowego typu analizator drgań wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem. Sprawdzenie stanu technicznego łożysk tocznych polega na porównaniu bieżących pomiarów z pewnym poziomem odniesienia oraz poziomem granicznym określanym, jako maksymalny dopuszczalny. Niestety w wielu krajowych zakładach przemysłowych, zwłaszcza w tych mniejszych, pomiary diagnostyczne łożysk tocznych sprowadzają się do oceny łożysk w oparciu o ogólne wytyczne norm drganiowych dla maszyn (pomiary prędkości drgań do 2 kHz). Postępowanie takie uniemożliwia racjonalną eksploatację maszyn, nie daje możliwości wczesnego wykrycia anomalii w pracy maszyn.

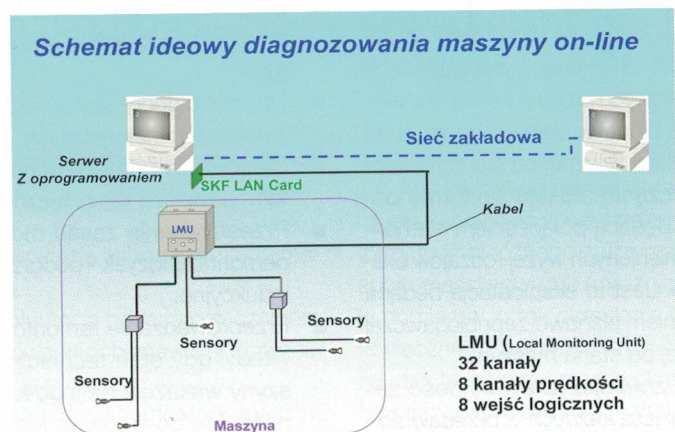
■ Monitoring stanu technicznego zespołów maszynowych w zakresie stanów dynamicznych

Zespoły maszynowe szczególnie ważne zwłaszcza w napędach krytycznych coraz częściej objęte są monitoringiem drganiowym. Wyróżnić można: układy monitoringu zabezpieczającego, układy monitoringu predykcyjnego oraz układy łączące te obydwie cechy. W ocenie własnej - na szczególną uwagę wśród systemów monitorujących stan

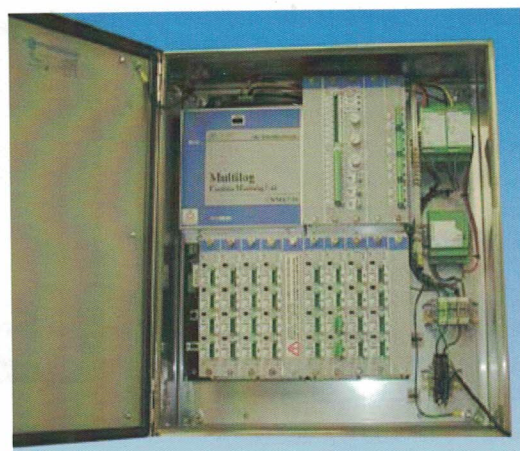
maszyn wirujących - zasługują systemy firm; Brüel & Kjaer, SKF, BENTLY NEVADA i SPM [4÷6, 15, 17, 18, 19]. Są to systemy najbardziej rozpowszechnione w Europie. Również w kraju cieszą się dużym uznaniem. Na uwagę w ocenie autora zasługują również urządzenia monitorujące krajowej firmy SENSOR i TECHNICAD [17, 18, 19]. Ideę diagnozowania maszyn on-line na przykładzie aparatury firmy SKF przedstawiono na rys. 2.

Systemami monitoringu szczególnie przydatnymi do diagnostyki łożysk ślizgowych są układy pomiarowe wykorzystujące pomiary drgań względnych. Wymienić tu można układy krajowej firmy TECHNICAD [19] i amerykańskiej firmy BENTLY NEVADA [18]. Systemy te są szczególnie popularne w krajo-

wych elektrowniach w monitorowaniu stanu turbozespołów. W ocenie autora najintensywniej rozwijane są systemy monitoringu obejmujące swym zasięgiem jeden zespół maszynowy, jeden napęd. Obok wymienionych już pomiarów drgań całego napędu, pomiarów temperatur w ważnych punktach napędu w tym w węzłach łożyskowych, pomiarów prądu, systemy mają możliwość monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych z wykorzystaniem metody SPM lub metody detekcji obwiedni. Przykładem niech będzie najpopularniejszy obecnie w kraju system diagnozowania i monitoringu firmy SKF, wykorzystujący oprogramowanie PRISM, Machine Analyst, przy współudziale analizatorów typu Microlog oraz urządzeń Multilog (rys. 3).



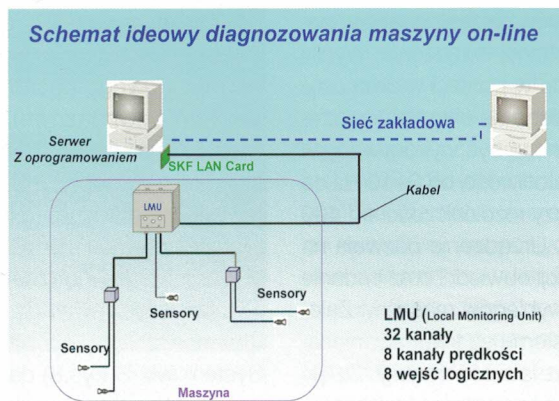
Rys. 2. Idea diagnozowania maszyn on-line na przykładzie aparatury firmy SKF [15]



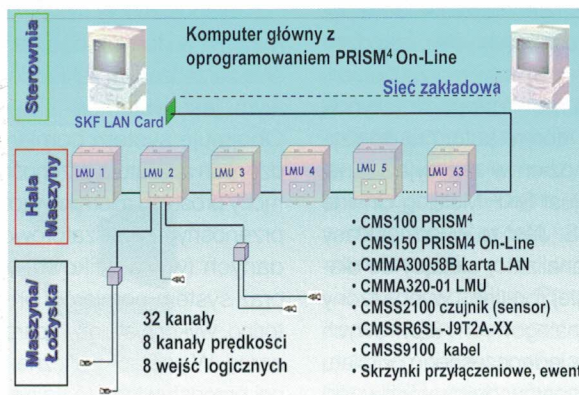
Rys. 3. System monitoringu Multilog firmy SKF [15]

Na rys. 4. przedstawiono ideę diagnozowania maszyn on-line na przykładzie jednej maszyny, a na rys. 5. na przykładzie wielu maszyn wg SKF w danym zakładzie przemysłowym [15]. Architektura systemu diagnozowania maszyn on-line wg SKF graficznie przedstawiono na rys. 6.

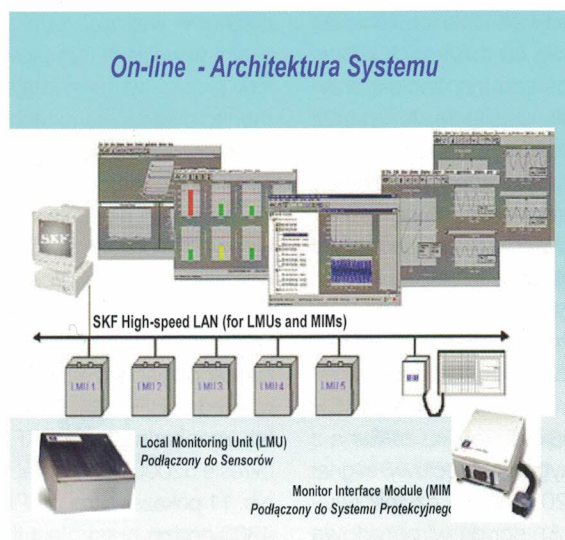
W przemyśle zachodnim i krajowym coraz częściej można spotkać urządzenie do monitoringu ciągłego wyprodukowane przez firmę SKF MasCon48 współpracujące z oprogramowaniem @ptitude Observer. MasCon48 jest jednostką pomiarową umieszczoną w szczelnej obudowie (IP66) służącą do monitoringu ciągłego maszyn pracujących w trudnych warunkach przemysłowych. System jest wyposażony w 32 wejścia analogowe lub wibracyjne lub w kombinację 24 wejść analogowych i 8 wibracyjnych. Dzięki specjalnym przetłacznikom każde z wejść można odpowiednio skonfigurować, w zależności od mierzonego sygnału (przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie, itp.). Za pomocą 16 kanałów cyfrowych może być mierzona prędkość. Urządzenie pozwala na jednoczesny pomiar wszystkich kanałów do częstotliwości 2 kHz, zaś pomiary z dwóch kanałów do częstotliwości 40 kHz. Maksymalna rozdzielczość to 6400 linii. Dla każdego z punktów pomiarowych można indywidualnie zaprogramować wartości ostrzegawcze i alarmowe zależne od wartości, prędkości obrotowej lub obciążenia. System może pracować w sieci LAN z innymi urządzeniami jak: komputery, drukarki, czy serwery. Urządzenie jest wyposażone w system samodiagnozy, którego zadaniem jest kontrolowanie kabli, czujników, systemów elektronicznych oraz wykrywanie ich uszkodzeń, zwarców oraz zakłóceń sygnału. Wykrycie usterki powoduje wyzwolenie specjalnego alarmu lub restart systemu [15]. Program @ptitude Observer może także współpracować z urządzeniami przenośnymi, np. z analizatorem PerCon. Przenośny analizator PerCon pozwala na równoczesny pomiar drgań w trzech kierunkach.



Rys. 4. Idea diagnozowania maszyn on-line na przykładzie jednej maszyny w danym zakładzie przemysłowym wg SKF [15]



Rys. 5. Idea diagnozowania maszyn on-line na przykładzie wielu maszyn w danym zakładzie przemysłowym wg SKF [15]



Rys. 6. Architektura systemu diagnozowania maszyn on-line wg SKF [15]

Wyniki pomiarów są zapisywane w pamięci wewnętrznej urządzenia. Wyniki są ukazywane w postaci widma częstotliwościowego na ekranie urządzenia. Pomiar może być wykonywany w zakresie częstotliwości od 0÷10 Hz do 0÷10 kHz, przy rozdzielczości od 400 do 6400 linii. Urządzenie pozwala na pomiar detekcji obwiedni oraz badanie rozbiegów i wybiegów maszyny. Zaletami tego systemu są trwałość, niezawodność oraz łatwość obsługi. Dzięki urządzeniu można przeprowadzać wyważanie jedno lub dwupłaszczyznowe. Dzięki opcji analizy prądowej silnika można wykonać pomiar oraz analizę pracy silników i generatorów, która pozwala na wczesne wykrycie uszkodzeń tych urządzeń [18]. Innym urządzeniem służącym do monitoringu maszyn w przemyśle, z którym autor ma do czynienia na co dzień w zaprzyjaźnionej cementowni jest SKF Multilog On-line System IMx-S. Jest to wysokiej klasy stacjonarny analizator służący do diagnostyki ciągłej (on-line), wyposażony w 16 wejść analogowych i 8 cyfrowych z możliwością jednoczesnego pomiaru wszystkich kanałów do częstotliwości 40 kHz. 4 kanały cyfrowe służą do pomiaru wszystkimi standardowymi impulsatorami, zaś kolejne 4 z impulsatorami sygnału prostokątnego w zakresie wyzwalania 12÷24 V. Analizator posiada również indywidualne zasilanie 24 V, maksymalnie 40 mA/kanał. Każdy z kanałów posiada trzy zaciski przyłączeniowe: P - zasilanie, A - sygnał oraz B - masa. Ponadto każdy z kanałów analogowych został wyposażony w 6 przełączników miniaturowych (DIP), które są ustawiane w zależności od badanego sygnału z czujnika [15]. Na rys. 7 przedstawiono schemat napędu jednego z młynów cementu, na którym zainstalowano wspomniany system.

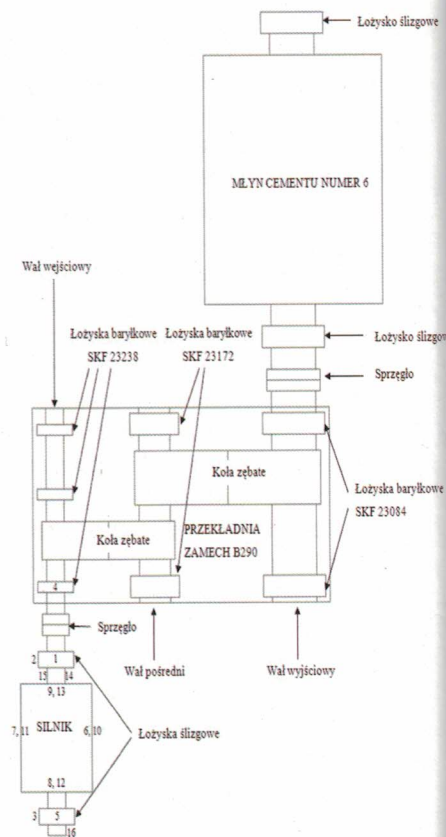
Do wyboru są: akcelerometr ICP (z wewnętrzną elektroniką, zasilaną z urządzenia), sygnał napięciowy, sygnał prądowy (4÷20 mA), B - czujnik (wyjście 4÷20 mA), sonda wiroprądowa (-24 V) oraz dzielnik napięcia. Kanały cyfrowe posiadają zaś po 4 przełącz-

niki miniaturowe (DIP), dzięki którym możemy mierzyć sygnał z impulsatora dwużyłowego (tacho) (24 V z zasilaniem wewnętrznym), impulsatora trzyżyłowego (tacho) NPN (24 V z zasilaniem wewnętrznym), impulsatora trzyżyłowego (tacho) PNP (24 V z zasilaniem wewnętrznym), impuls 12-24 V (zasilanie zewnętrzne) oraz impuls TTL (zasilanie zewnętrzne) [4, 5]. System monitoringu SKF Multilog On-line System IMx-S (rys.8) daje możliwość pomiaru i analizy dowolnego sygnału diagnostycznego towarzyszącego pracy maszyn, dostępnego tak w postaci analogowej, jak i cyfrowej.

Współcześnie system diagnostyki maszyn w danym, dobrze i nowoczesnie zarządzanym zakładzie przemysłowym, jest systemem zintegrowanym. Obejmuje system pomiarów prowadzonych aparaturą przenośną, przy pomocy prostych mierników (obchodowy), przenośnych analizatorów - zbieraczy danych (wykwalifikowany personel) oraz system pomiarów on-line, monitoring, wykorzystujący aparaturę stacjonarną. W postaci graficznej uproszczonej przedstawiono to na rys. 9. System ten może być rozbudowany o bezprzewodowy przekaz sygnałów. Ilustruje to rys. 10.

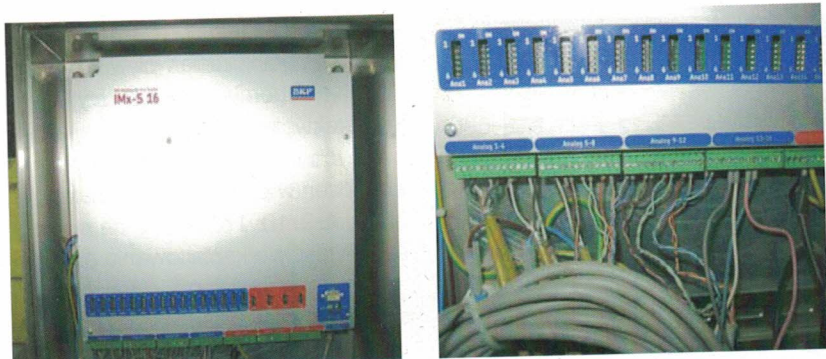
Obok wymienionych już pomiarów drgań całego napędu, pomiarów temperatur w ważnych punktach napędu w tym w węzłach łożyskowych, pomiarów prądu, systemy mają możliwość monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych z wykorzystaniem metody SPM lub metody detekcji obwiedni.

Na rys. 11 przedstawiono przykładowe wyniki monitoringu stanu łożyska baryłkowego 22244 w przykładowym silniku. Jest to trend składowej łożyskowej BPFi (uszkodzenie bieżni wewnętrznej), sygnał przyspieszenia drgań, detekcja obwiedni, BPFi=89,51 Hz, filtr $f=0,03$ Hz, monitoring firmy SKF, Multilog. W okresie 52000 godzin pracy łożyska, na rys. 11 pokazano trend BPFi za ostatnie 4300 godzin pracy. Jest to bardzo ciekawy wykres. Charakter zmian wartości składowej BPFi od $0,69$ m/s² do $21,8$



Rys. 7. Schemat napędu młyna cementu oraz rozmieszczenie czujników na diagnozowanych elementach napędu odpowiednio: 1-5 - akcelerometry CMSS-2200, 6-9 - czujniki do pomiaru temperatury Pt-100, 10-13 - czujniki wilgotności HIH-4000, 14, 15 - czujniki wiroprądowe Technicat MDS10/MDT10, 16 - znacznik fazy Technicat MDS10/MDT10 [18]

m/s² (wzrost o 30 dB) można aproksymować 5 liniami prostymi i przewidzieć czas koniecznej wymiany łożyska (np. wykorzystując kryterium autora). Na charakterystyce nie ma obszaru typu wzrost wykładniczy. W ocenie autora taki liniowy charakter zmian wartości mierzonych ma miejsce bardzo często, znacznie częściej niż zmiany o charakterze wykładniczym. Jest to widoczne dopiero wtedy, gdy pomiary wykonuje się odpowiednio często właśnie w ostatniej „fazie życia” maszyn. Określenie granic stanów eksploatacyjnych maszyn, w ocenie autora, powinno być wykonane indywidualnie dla każdej maszyny. Prze-



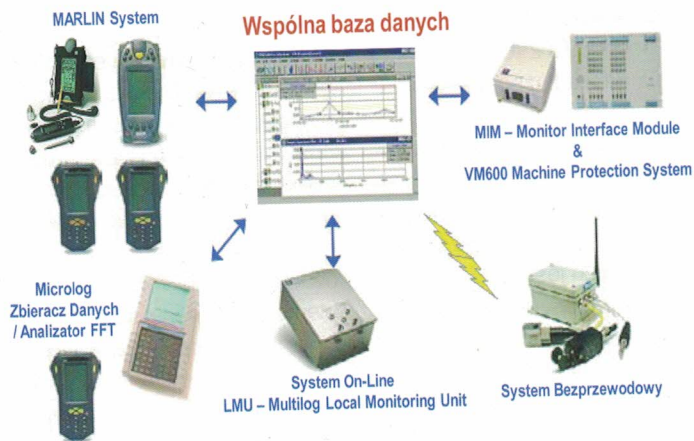
a) wygląd zewnętrzny

b) widok od środka

Rys. 8. System monitoringu SKF Multilog on-line, System IMx-S [15]



Rys. 9. Uproszczony schemat ideowy zintegrowanego system diagnostyki w danym zakładzie przemysłowym wg SKF [15]

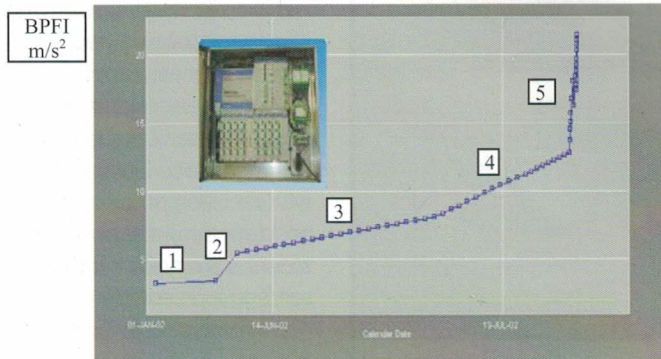


Rys. 10. Uproszczony schemat ideowy zintegrowanego system diagnostyki w danym zakładzie przemysłowym rozbudowany o bezprzewodowy przekaz sygnałów wg SKF [15]

widywanie przyszłej zmiany stanu maszyn na podstawie dostępnych symptomów diagnostycznych określane jako prognozowanie stanu, jest elementem tego procesu. Zasadą prognozowania jest możliwość obliczenia następnych wartości elementu szeregu czasowego (symptomy diagnostyczne) na podstawie znajomości wartości elementów szeregu z przedziału czasu dostępnego, wykorzystując pewne formalne zależności lub zbiór tych zależności. Niezbędne jest dysponowanie modelem trendu symptomu. Teoretycznie model może być dowolnie skomplikowany. W przemysłowych systemach monitoringu silników w oparciu o pomiary drgań, uwzględniając realia pomiaru, walory aparatury, wyniki wcześniejszych badań eksperymentalnych, prawie w 100% (ocena autora) przyjmuje się, że procesy zużywania się maszyn przebiegają jednostajnie. Przyjmuje się, że trend symptomu jest prostą funkcją rosnącą monotonicznie np. liniowo (najczęściej) lub eksponencjalnie. Przykładem niech będzie najpopularniejszy obecnie w kraju system diagnozowania i monitoringu firmy SKF, wykorzystujący oprogramowanie PRISM, Machine Analyst, przy współudziale analizatorów typu Microlog oraz urządzeń Multilog. Autor uważa, że w ogromnej większości przypadków dla prostych zespołów maszynowych, zwłaszcza wolno-obrotowych (prędkości do 1000 obr./min) można stosować układy monitoringu, w których pomiar dla poszczególnych kanałów odbywa się na zasadzie multipleksowania (pomiar po kolei dla każdego kanału z osobna). W złożonych układach napędowych, zwłaszcza w szybkoobrotowych, pomiar w poszczególnych kanałach powinien odbywać się równocześnie.

■ Monitoring stanu technicznego izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych

Wyniki badań stanu izolacji uzwojeń silników decydują o dopuszczeniu silnika do eksploatacji, warunkują



Rys. 11. Trend składowej BPF1 dla łożyska 22244 w przykładowym silniku [17, 18]

jego bezpieczną eksploatacją [1, 2, 3, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18]. Badania izolacji uzwojeń silników prowadzone w oparciu o wykorzystanie najnowszej aparatury diagnostycznej w ocenie własnej należą do najtrudniejszych, najdłużej trwających i najbardziej kosztownych. Badania stanu izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych i możliwości wczesnego ostrzeżenia o jego ewentualnym pogarszaniu się mają duże znaczenie praktyczne dla prawidłowej eksploatacji maszyn. Wiąże się to z dużymi kosztami przewijania stojanów silników WN. Stosowane obecnie układy izolacyjne, są bardzo dobrej jakości, odporne na zawilgoceenie, szkodliwe wpływy atmosferyczne. Posiadają również dobrą wytrzymałość mechaniczną, dobrze znoszą drgania, na które mogą być narażone połączenia czołowe uzwojeń. Coraz większe rozpowszechnianie się układów przekształtnikowych do zasilania maszyn, stosowanie szybkich wyłączników, jak również częste rozruchy silników przy bezpośrednim załączeniu na napięcie znamionowe powodują, że izolacja uzwojeń może być naprężana zarówno dielektrycznie, jak i mechanicznie, przy czym wywołane nimi uszkodzenia mogą mieć charakter zmęczeniowy. W ostatnim 60-leciu, w krajach najbardziej przemysłowych daje się zauważyć tendencję do wykorzystywania coraz częściej sygnału wyładowań niepełnych - wnz, (*ang. Partial Discharges - PD*) [1, 2, 3, 7, 9, 10, 17, 18] towarzyszących pracy maszyn elektrycznych

do oceny stanu izolacji ich uzwojeń. PD są odpowiedzialne za :

- Wyładowania w żłobach
- Rozwarstwienie
- Szczeliny
- Luzy uzwojenia
- Wyładowania na czołach uzwojenia.

Termiczne, mechaniczne, elektryczne i chemiczne czynniki prowadzą do starzenia się izolacji uzwojeń. Intensywność starzenia i efekty takiego starzenia mogą być oceniane przez monitorowanie PD. Starzenie prowadzi do pogorszenia się właściwości elektrycznych, a nawet może być przyczyną uszkodzenia uzwojenia. Początkowo do pomiarów sygnałów PD używano oscyloskopów. Technika ta wymagała bardzo dużego doświadczenia. Najtrudniejszym zagadnieniem przy pomiarach wnz maszyn elektrycznych jest wpływ zakłóceń na wyniki pomiaru. Zakłócenia mogą pochodzić z różnych źródeł (sprężenia galwaniczne, elektromagnetyczne, charakter zasilania) [1, 2, 3, 7, 9, 10, 17, 18]. Wpływ zakłóceń jest szczególnie istotny, gdy pomiary odbywają się w warunkach przemysłowych, gdzie źródeł zakłóceń jest bardzo wiele, a poziom zakłóceń jest duży.

Pomiary wnz maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowych, a więc w warunkach o wysokim poziomie zakłóceń wymagają opracowania metod pomiaru pozwalających na oddzielenie sygnałów wnz od zakłóceń i szumów. Zagadnienie metod eliminacji zakłóceń przy pomiarach wnz jest przedstawione

w literaturze [1, 2, 3, 7, 9, 10, 17, 18]. Metody ograniczenia wpływu zakłóceń na wyniki pomiarów wnz weryfikowano praktycznie. Do najczęściej stosowanych metod ograniczenia wpływu zakłóceń w pomiarach wnz należą [1, 2, 3, 7, 9, 10, 17, 18]:

- Właściwe kształtowanie środowiska pomiarowego.
- Pomiary w układzie mostkowym.
- Wstępna analogowa filtracja sygnału mierzonego.
- Dyskryminacja poziomu i biegunowości impulsów.
- Selekcja impulsów metodą okna czasowego.
- Eliminacja zakłóceń metodą okna czasowego.
- Zastosowanie techniki określania kierunku propagacji sygnału.
- Cyfrowe przetwarzanie sygnałów.

Badania diagnostyczne stanu izolacji on-line maszyn elektrycznych wprowadzono w latach 50. ub. w. [17, 18]. Były to badania wnz generatorów. Pierwsza metoda polegała na pomiarze wnz w przewodzie łączącym punkt neutralny uzwojenia stojana generatora z ziemią. Do pomiarów wykorzystano przekładniki prądowe wysokiej częstotliwości HFCT (High Frequency Current Transformer) różnych rodzajów w tym RFCT (Radio Frequency Current Transformer) [17, 18]. Metoda okazała się być mało czuła. W latach późniejszych do pomiarów zaczęto używać kondensatorów sprzęgających przyłączanych do zacisków generatorów. Wykorzystywano mierniki zakłóceń radioelektrycznych oraz oscyloskopy. Wizualizacja sekwencji impulsów wnz obserwowana dla cyklu napięcia probierczego była przedstawiona na liniowym wykresie podstawy czasu lub na elipsie. Poważnym problemem dla wiarygodności pomiarów wnz generatorów okazał się wpływ zakłóceń. W ocenie autora prawdziwym przełomem w poprawie użyteczności i wiarygodności badań on-line przy wykorzystaniu pomiarów wnz było: opracowanie w połowie lat 70. ub. w. w Ontario-Hydro, w Kanadzie dla po-

trzeb diagnozowania hydro-generatorów metody i aparatury nazwanej PDA (Patrial Discharge Analyzer) [1]. W 1986 FES International (Adwel) stał się pierwszym komercyjnym dostawcą systemu PDA (rys. 12÷18). Metoda polega na pomiarze wnz w układzie różnicowym, w którym eliminowane są zakłócenia. Czujnikami są kondensatory pomiarowe bezwyładowaniowe PD (80, 500 lub 1000pF).

W ocenie autora należy tu wymienić przede wszystkim rozwiązania techniczne pionierów: firmy Adwel, Catler-Hammer, Iris. Początkowo przedmiotem zainteresowania tych firm były generatory i hydrogeneratory, a dopiero później silniki WN dużej mocy. Autor stwierdza, że aparatura do diagnostyki stanu izolacji silników elektrycznych on-line jest w zakładach przemysłowych w krajach zachodnich instalowana. Liczba zainstalowanych systemów systematycznie się zwiększa i szacowana jest na tysiące. W kraju znanych jest autorowi już kilkadziesiąt przypadków zainstalowania przez właścicieli zakładów systemów do oceny stanu izolacji on-line silników na stałe w napędach, o krytycznym znaczeniu dla procesu produkcji.

Zasady montażu czujników pojemnościowych są ściśle określone [1] rys. 12÷14. Metoda ta jest stosowana z powodzeniem w pomiarach wnz maszyn elektrycznych do chwili obecnej.

■ Mobilne analizatory wnz

W ostatnim czasie do dyspozycji diagnostów stanu izolacji uzwojeń firmy produkujące aparaturę diagnostyczną oddają wielokanałowe, przenośne analizatory przeznaczone do rejestracji i analizy wyładowań niepełnych w układach izolacyjnych maszyn wysokiego napięcia. W ocenie autora jest to „nowa jakość” w diagnostyce izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych. Przykładem takiego urządzenia jest przenośny analizator R2200 rosyjskiej firmy Dimrus [7] (rys. 19). Autor dysponuje tym analizatorem. Wyróżniającą cechą

analizatora jest wbudowany system ekspercki o nazwie PD-Expert.

Umożliwia on na podstawie bazy defektów, udostępnionej dzięki producentowi i wzbogacanej na bieżąco przez użytkownika, określanie przyczyny powstania uszkodzenia [7]. Urządzenie to można wykorzystywać w dwóch trybach pracy, podczas pomiarów okresowych oraz jako tymczasowy stacjonarny monitoring badanego obiektu. Badanie impulsów wnz w analizatorze odbywa się w oparciu o algorytmy diagnostyczne. Ich realizacja przebiega w czasie rzeczywistym. Podstawowe algorytmy to [7]:

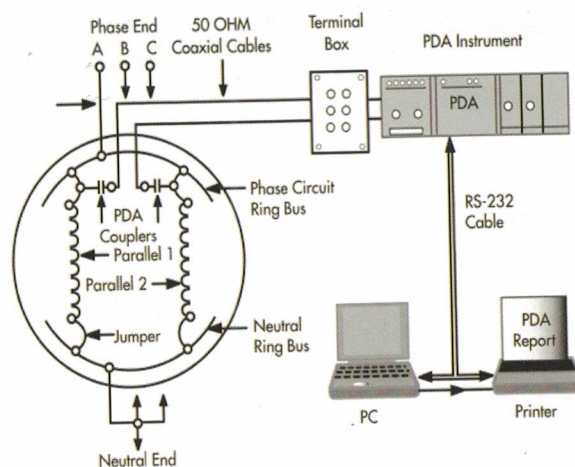
- Analiza własności częstotliwościowych rejestrowanych impulsów wnz.
- Analiza kształtu impulsów.
- Porównanie synchroniczne wartości

amplitud pomiędzy głównym kanałem rejestrującym a innymi kanałami.

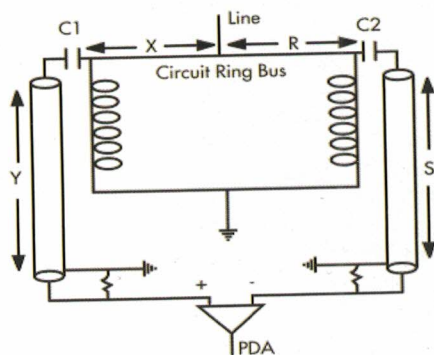
- Analiza opóźnień pomiędzy impulsami wchodzącymi w kanał analizowanym w stosunku do impulsów rejestrowanych w pozostałych wybranych kanałach.

- Porównywanie biegunowości impulsów pomiędzy sąsiednimi kanałami pomiarowymi.

Na wejściu każdego kanału znajduje się filtr, który ma za zadanie wyodrębnienie sygnałów z obszaru od 0,5 do 10 MHz, co odpowiada zakresowi pomiarowemu wnz [7]. Użytkownik wybiera ilość kanałów pierwotnych oraz ich funkcje. Na podstawie automatycznych algorytmów i filtrów ustawionych przez użytkownika dokonywana jest



Rys. 12. Standardowa instalacja różnicowa PDA [1]



Dostosowanie długości przewodów sygnałowych takich jak,

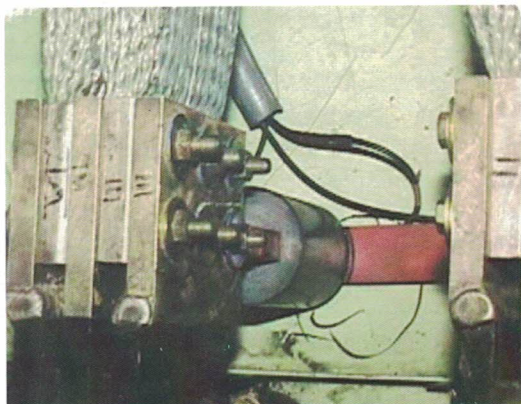
$$X + Y/0.65 = R + S/0.65$$

gdzie,

X i R = długość obwodu szynowego

Y i S = długość kabla koncentrycznego

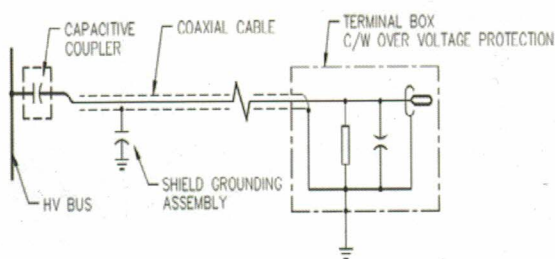
Rys. 13. Wytyczne montażu czujników [1]



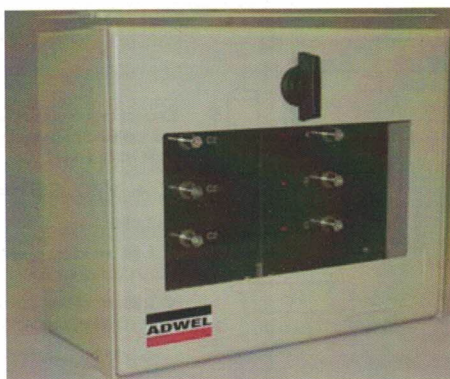
Rys. 14. Przykładowy montaż czujników pojemnościowych w silniku [1]



Rys. 15. Czujniki pojemnościowe do pomiarów wnz [1]



Rys. 16. Układ do pomiarów wnz dla jednej fazy silnika [1]



Rys. 17. Aparatura stacjonarna PDA [1]

selekcja. Prowadzi to do określenia czy dany impuls powstał w wyniku wnz, czy jest spowodowany szumami. Impulsy zarejestrowane podczas pomiarów analizatorem R2200 zapisywane są w jego pamięci. Na ich podstawie po zakończeniu pomiaru, na ekranie analizatora można uzyskać informacje takie, jak pokazano na rys. 20 [7]. Pod 1 znajdują się dane opisujące ilość zarejestrowanych impulsów dodatnich i ujemnych oraz obliczona moc wyładowań (PDI). Pole 2 to czasowo - częstotliwościowy rozkład impulsów w skrócie TFM (*ang.* - *Times Frequency Map*). Osie współrzędnych tego pola: na oś Y - czas trwania każdego impulsu, oś X - częstotliwość impulsów. Kolorami przedstawiona została ilość impulsów o tych samych parametrach. Pole nr 3 przedstawia rozkład mocy (PDI) w zależności od kąta fazowego. Pod 4 znajduje się amplitudowo-fazowo-częstotliwościowy rozkład impulsów. Oś odciętych to okres napięcia sieci, natomiast na osi rzędnych umieszczone są wartości amplitudy rejestrowanych impulsów. Tłem wykresu na rys. 10. jest umowna sinusoida sieci zasilającej, dzięki której można przypisać moment powstania impulsu wnz [7].

■ Własne rozwiązania i konstrukcje

W zespole autora od 2000 r. trwają prace nad opracowaniem metodyki pomiarów wnz, nad własnymi rozwiązaniami czujników do pomiarów wnz, nad konstrukcją sond pomiarowych oraz aparatury pomiarowej w tym nad opracowaniem analizatorów mobilnych wnz. W ciągu 16 lat intensywnych badań opracowano m. in.:

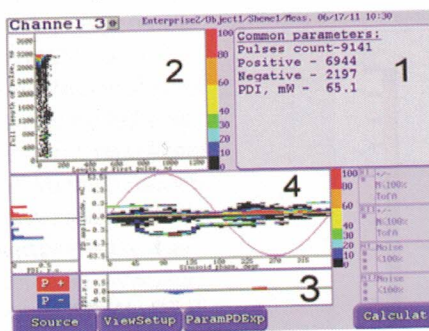
1. Metodykę pomiarów wnz silników w warunkach ich przemysłowej eksploatacji, umożliwiającą wykrycie uszkodzeń izolacji uzwojeń. Opracowano i wykonano zespoły antenowe. Czujniki do pomiaru temperatury w silnikach typu termorezystory RTD, np. Pt100 wyposażone w zespoły antenowe własnej konstrukcji stają się anteną, służącą do



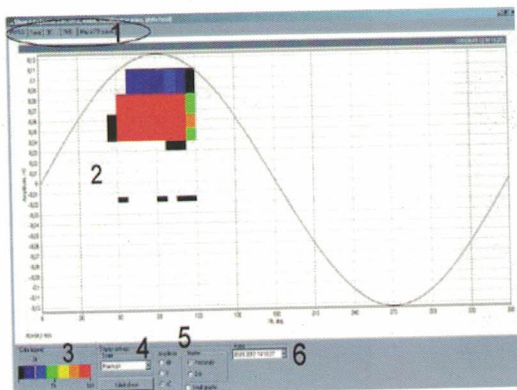
Rys. 18. Aparatura przenośna PDA [1]



Rys. 19. Widok zewnętrzny przenośnego analizatora R2200



Rys. 20. Obraz rozkładu wnz - zrzut ekranu z analizatora R2200 [7]



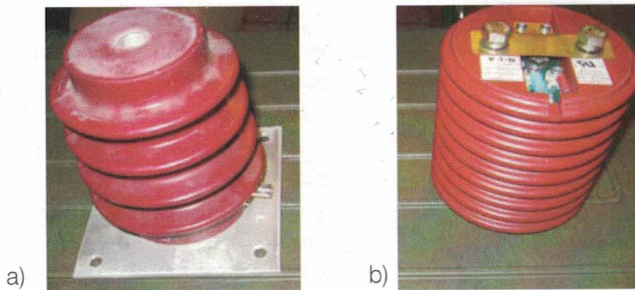
Rys. 21. Rozkłady fazowo-rozdzielcze zmierzonych impulsów wnz [7]

pomiarów wnz w zakresie 1÷200 MHz. W zespoły antenowe można wyposażyć dowolne RTD znajdujące się w silniku, jak również zamontować według potrzeb dodatkowe RTD w przestrzeniach czoł uzwojeń silników i wyposażyć je we wspomniane zespoły antenowe [17, 18].

2. Opracowano i wykonano bardzo prosty oraz tani czujnik wnz typu antena. Antenę tworzy; długi przewód ($L \gg d$, L - długość, d - średnica przewodu) poprowadzony wokół czoł uzwojeń silnika. Jest to najprostsza antena odbiorcza w MHz-owym zakresie częstotliwości, dobrana eksperymentalnie, wyposażona we wspomniany już zespół antenowy własnej konstrukcji [17, 18].

3. W ramach realizacji projektu badawczego własnego Nr N N 510536639. Czujniki do pomiarów off-line i on-line wyładowań niezupetnych w silnikach elektrycznych oraz system kalibracji torów pomiarowych, autor wraz z zespołem współpracowników podjął temat konstrukcji krajowych czujników do pomiarów wnz. Wojciech Kandora w ramach realizacji pracy doktorskiej [13] zaprojektował i wykonał m. in. kondensatory produkcji własnej do pomiaru wnz WN silników elektrycznych (rys. 22). Do głównych zalet tego typu kondensatorów należą: małe gabaryty, niski współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta < 1\%$, duża wytrzymałość elektryczna. Czujniki zostały przystosowane do współpracy z systemem monitoringu wnz on-line i nie wymagają budowy impedancji sprzęgającej.

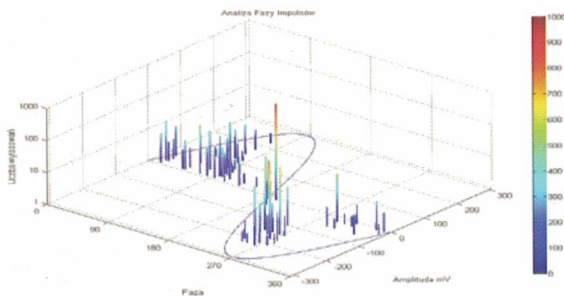
4. Z dostępnych komponentów elektronicznych zbudowano przenośny zestaw aparaturowy do pomiarów i analizy wnz w silnikach elektrycznych - rys. 23 [17, 18]. Zestaw aparaturowy może współpracować z dowolnymi czujnikami wnz typu: kondensatory sprzęgające, termorezystory RTD, czujniki RFCT, cewki Rogowskiego zarówno sztywne, jak i elastyczne. Ma możliwość pomiarów temperatury uzwojeń, prądu, wilgotności względnej. System ochrony przed niekorzystnym wpływem



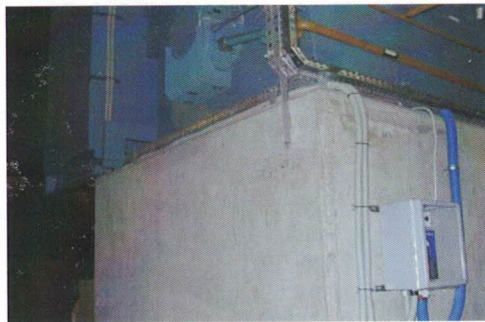
Rys. 22. Kondensatory do pomiaru wnz a) produkcji własnej b) produkcji amerykańskiej



Rys. 23. Przenośny zestaw aparatury do pomiarów i analizy wnz w silnikach elektrycznych produkcji własnej [17, 18]



Rys. 24. Przykładowe wyniki pomiarów wnz otrzymane na wielokanałowym mobilnym analizatorze wnz produkcji własnej



Rys. 25 System InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu stanu izolacji uzwojeń silników elektrycznych

zakłóceń zewnętrznych jest podobny jak w analizatorze PDA. Pomiar wnz odbywa się w zakresie od 1÷200 MHz. Synchronizacja pracy zestawu aparaturowego może odbywać się napięciem dostępnym w miejscu pomiarów silnika. Zbudowany zestaw umożliwia również wykonanie pomiarów wnz silników typu off-line.

5. Opracowano technikę kalibracji toru pomiarowego przy pomiarach wnz silników elektrycznych w warunkach przemysłowych [17, 18].

6. Opracowano konstrukcje przenośnych sond do pomiarów wnz w WN maszynach elektrycznych [17, 18].

7. Trwają prace nad konstrukcją własnego wielokanałowego mobilnego analizatora wnz. Kolejna wersja poddawana jest próbom przemysłowym. Poniżej przedstawiono rys. 24 z przykładowymi wynikami pomiarów.

■ Przykład monitoringu stanu izolacji w przemyśle

Na rys. 25 przedstawiono napęd krytyczny o mocy 7 MW w jednym z zakładów branży samochodowej z zainstalowanym systemem Insul-Gard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu stanu izolacji uzwojeń silników elektrycznych. W uproszczeniu schemat blokowy układu InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu ciągłego przedstawiono na rys. 26. Rys. 27 i 28 przedstawia skrzynkę zewnętrzną oraz skrzynkę wyprowadzeń termorezystorów układu InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu stanu izolacji uzwojeń. Czujnikami wnz są: 3 kondensatory sprzęgające bezindukcyjne, bezwyładowaniowe w opcji 500 pF, 6 termorezystorów RTD, 3 cewki Rogowskiego, czujniki HFCT, RFCT, SSC. Prąd silnika jest mierzony cewką Rogowskiego, równocześnie mierzona jest temperatura uzwojeń silnika oraz wilgotność względna. Pomiary mogą być wykonywane w zasadzie w dowolnej opcji czasowej, poczynając od okresu co 5 sekund. Wielkościami

mierzonymi są: n , q , j , Q_m , PDI , $NQN+$, $NQN-$ [17, 18]. Oprogramowanie umożliwia wizualizację wyników w opcji: wartości maksymalne, uśrednione, minutowe, godzinowe, dobowe, tygodniowe, za różne czasookresy pracy, w jednostkach bezwzględnych i względnych. Istnieje możliwość liczenia współczynników korelacji. Podstawową jednostką dla Q_m są mV i V .

Jeżeli tory pomiarowe są wcześniej wykalibrowane (przypadek bardzo rzadki), wtedy Q_m można wyrażać w jednostkach ładunku. Ograniczenie wpływu zakłóceń jest podobne jak we wspomnianym systemie PDA. Istnieje możliwość dodatkowego wykorzystania kanału szumowego, co umożliwia ustawienia wartości progowych poziomu sygnału uznanego za użyteczny. Urządzenie posiada możliwość podania na układ przekaźnikowo-stycznikowy informacji o przekroczeniu progów alarmowych dla Q_m , PDI i trendu. Progi alarmowe ustawia z poziomu komputera ekipa instalująca urządzenie. W trakcie eksploatacji silnika istnieje możliwość zmiany poziomów progów, jeżeli posiada się odpowiednie uprawnienia.

Rys. 29 przedstawia przykładowe rozkłady fazowo-rozdzielcze pomiarów wzn dla napędu krytycznego, natomiast rys. 30 ilustruje wykresy trendu PPS na poszczególnych kanałach dla uśredniania miesięcznego. Z pomiarów wykonanych w czasie 6 lat wynikają następujące najważniejsze wnioski:

- Przy obserwowanym ciągłym wzroście aktywności wzn pojawia się anomalia polegająca na gwałtownym obniżeniu się aktywności i nie jest to spowodowane warunkami pracy. W ocenie firmy CUTLER-HAMMER taka sytuacja jest alarmowa i wymaga natychmiastowego wyjaśnienia. Należy dokonać przeglądu silnika i aparatury monitorującej stan izolacji, zwłaszcza sprawdzić czujniki wzn (rys. 30, 31).
- Częstotliwość impulsów wzn w funkcji amplitudy wyładowań odniesiona do impulsów o polaryzacji dodatniej i ujemnej z uwzględnieniem

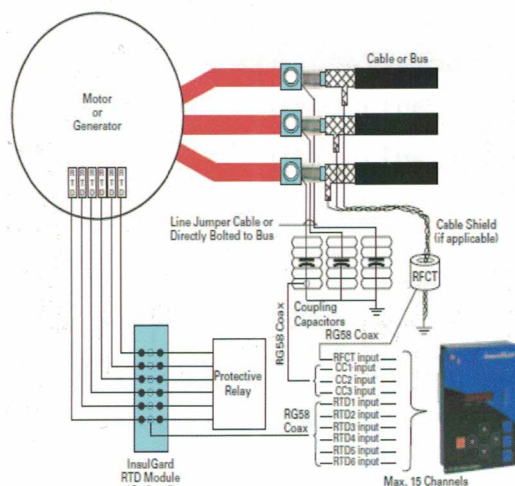
zmian obciążenia świadczy o luźnych uzwojeniach silnika (rys. 32).

- Wobec takich wniosków diagnostycznych kierownictwo firmy zaplanowało przerwę produkcyjną oraz okres przeglądów i remontów.
- Przegląd silnika potwierdził luźne uzwojenia.

Na rys. 31 przedstawiono krzywą życia układu izolacyjnego dla przykładowej maszyny elektrycznej według firmy CUTLER-HAMMER [9].

■ Uwagi końcowe w obszarze stanów dynamicznych maszyn

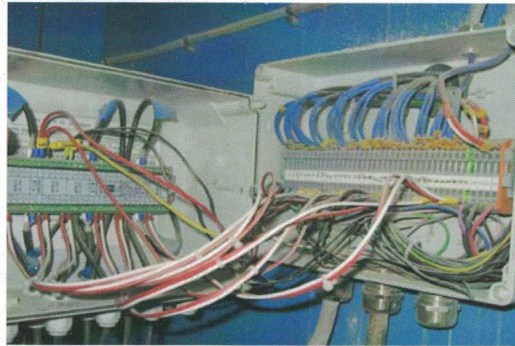
Jedną z możliwych dróg obniżenia kosztów działalności w przemyśle i energetyce, jest objęcie całego parku maszynowego kompleksowym programem zabezpieczenia, diagnostyki i zarządzania maszynami (systemem nadzoru maszyn). System monitorowania i zabezpieczeń realizuje funkcję ochrony maszyn przed uszkodzeniami lub katastrofalnymi zniszczeniami w sytuacjach pogorszenia się jej stanu dynamicznego. System taki w połączeniu z odpowiednimi torami pomiarowymi, pozwala zrealizować pełny nadzór zespołów maszynowych. Informacja o



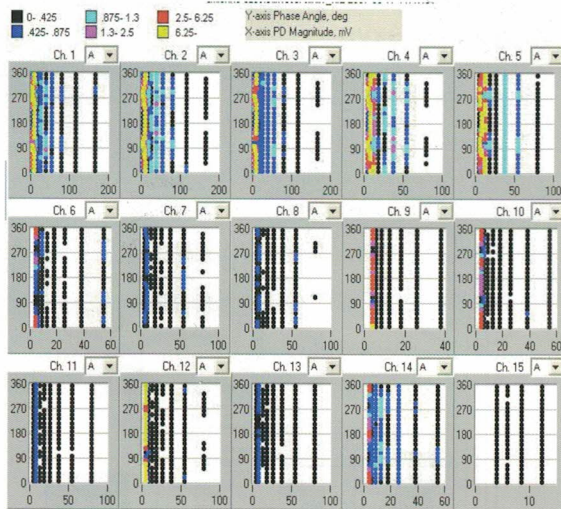
Rys. 26. Uproszczony schemat blokowy układu InsulGard firmy CUTLER-HAMMER do monitoringu ciągłego stanu izolacji uzwojeń [9]



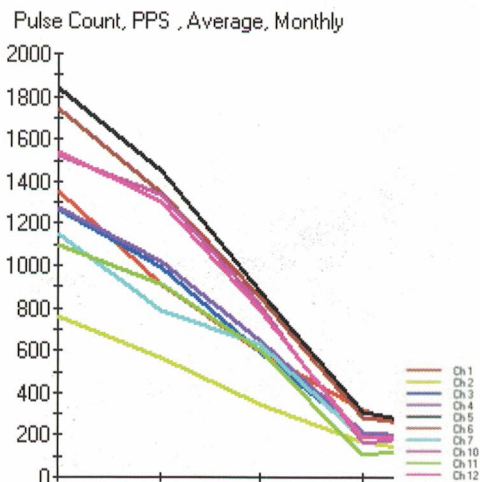
Rys. 27. Skrzynka zewnętrzna układu InsulGard do pomiarów wzn firmy CUTLER-HAMMER [9]



Rys. 28. Skrzynka wyprowadzeń termorezystorów RTD układu InsulGard do pomiarów wzn firmy CUTLER-HAMMER [9]



Rys. 29. Przykładowe rozkłady fazowo-rozdzielcze pomiarów wzn dla napędu krytycznego z rys. 25



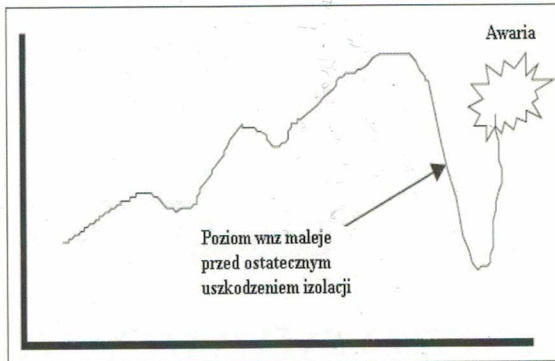
Rys. 30. Wykresy trendu PPS na poszczególnych kanałach dla uśredniania miesięcznego

szybkości zmian stanu technicznego pozwala określić przewidywany czas niezbędny do dokonania naprawy maszyny, w wielu sytuacjach zakres takiej naprawy, a zatem w konsekwencji czas potrzebny na realizację zaplanowanych prac. Można powiedzieć, że właściwa gospodarka remontowa prowadzi do całkiem nowego pojęcia związanego z eksploatacją posiadanego parku maszynowego - zarządzania maszynami. Zarządzanie maszynami umożliwia obniżenie kosztów produkcji, umożliwia wybór do eksploatacji maszyn o najlepszym stanie technicznym, planowania zarówno zakresów, jak i kosztów remontów. Osiągnięcie tych celów jest możliwe, gdy systemy nadzoru maszyn zostaną uzupełnione systemami akwizycji danych diagnostycznych, ich archiwizacji i wizualizacji, systemami przetwarzania tych danych i ich analizy oraz systemami dostarczającymi informację o stanie maszyn.

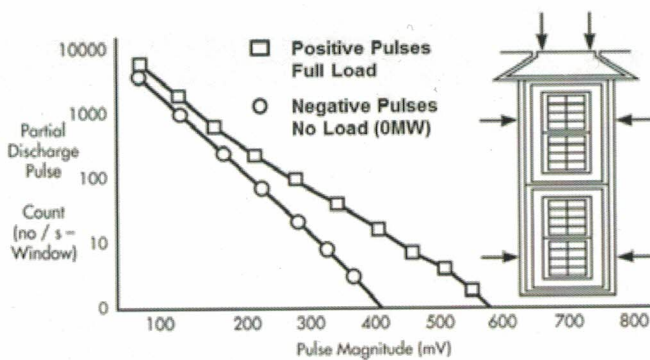
■ Uwagi końcowe w obszarze stanu izolacji maszyn elektrycznych

Pracy maszyn elektrycznych towarzyszą wyładowania niepełne. Charakter wzn jest bardzo złożony. W miarę upływu czasu eksploatacji maszyn, obserwuje się zmianę intensywności wzn przy charakterystycznych rozkładach fazowo-rozdzielczych. Diagnostykę można prowadzić w oparciu o wszystkie dostępne czujniki wzn. W trakcie badań własnych autor z zespołem opracował własne konstrukcje czujników i przyrządów, służące do pomiarów wzn w maszynach elektrycznych. Proponowane własne rozwiązania w warunkach przemysłowych sprawdziły się. Wyniki pomiarów wzn silników zależą od: stanu ich izolacji, obciążenia silnika, temperatury uzwojeń, wilgotności, poziomu zakłóceń zewnętrznych oraz od charakterystyki czujników wzn i aparatury analizującej wzn.

□



Rys. 31. Krzywa życia układu izolacyjnego dla przykładowej maszyny elektrycznej według firmy CUTLER-HAMMER [9]



Rys. 32. Częstotliwość impulsów wnz w funkcji amplitudy wyładowań dla przykładowej maszyny elektrycznej z luźnym uzwojeniem [1]

Literatura:

[1] ADWEL: PD monitoring. Nota Aplikacyjna 2003.
 [2] Bertenshaw D., Sasic M.: On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies on Improved Sensitivity Couplers. Nota Aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
 [3] Blokhintsev, M. Golovkov, A. Golubev, C. Kane: Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment, IEEE PES'98, February 1-5, Tampa. Instrukcja systemu monitorującego wnz InsulGard firmy Cutler-Hammer 2007.
 [4] Brüel & Kjær: Machine Condition Monitoring. Application notes BR 0267-13.
 [5] Brüel & Kjær: Systematic Machine Condition Monitoring. Application notes BO 0299-11.

[6] Brüel & Kjær: Machine Condition Monitoring using Vibration Analysis. Application notes BO 0247-11.
 [7] DIMRUS: Analizator R2200, nota aplikacyjna, dokumentacja 2011.
 [8] Dwojak J., Szymaniec S.: Diagnostyka eksploatacyjna zespołów maszynowych w energetyce. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, zeszyt nr 344.
 [9] Firma Cutler-Hammer: Instrukcja systemu monitorującego wnz InsulGard firmy Cutler-Hammer 2007.
 [10] Golubev A, Paoletti G.: Partial Discharge Theory and Technologies related to Medium Voltage Electrical Equipment. 2000 IEEE. Reprinted, with permission, from Paper 99-25 presented at the IAS 34th Annual Meeting, Oct 3-7, '99, Phoenix, AZ.

[11] Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Wyd. BO-BRME, Katowice 1998.

[12] Gulski E.: Diagnostowanie wyładowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji. Wyd. Polit. Warszawskiej, Warszawa 2003.

[13] Kandora W.: Diagnostyka off-line izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych wykonanych w technologii Resin-Rich. Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, Opole, 2012.

[14] Sasic M.: Partial discharge measurement on rotating machines. 9th National Congress of Electric Rotating Machinery September 29 to October 2, 1999, Veracruz, Mexico.

[15] SKF.: Integrated Condition Monitoring 2014.

[16] Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: Electrical insulation for rotating machines. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.

[17] Szymaniec S.: Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji. Studia i Monografie z.193. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006.

[18] Szymaniec S.: Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2013, Opole, Studia i Monografie, zeszyt 333.

[19] TECHNICAD; TNC 2010 aparatura do nadzoru maszyn wirnikowych. Nota Aplikacyjna, Gliwice 2000.

