

# Utrzymanie ruchu w przemyśle. Wstęp

Sławomir Szymaniec, Marek Kacperak

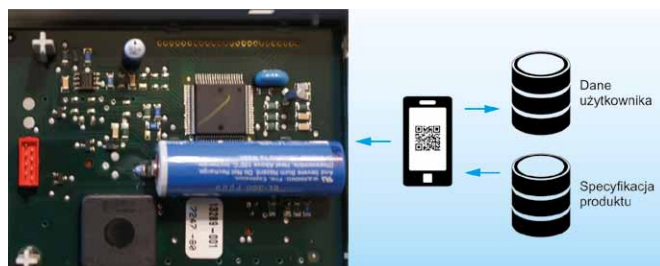
Obserwując życie gospodarcze w kraju, autorzy monografii nie dostrzegają wyraźnych znamion merytorycznego przygotowania przemysłu, energetyki ani usług do zaistnienia czwartej rewolucji przemysłowej.

Współczesne uwarunkowania rynkowe stawiają wysokie wymagania przed wszystkimi firmami uczestniczącymi w konkurencyjnej rywalizacji o odbiorcę produktów lub usług. Wskutek intensywnego rozwoju techniki, zwłaszcza w ostatnich latach, budowane są coraz to bardziej skomplikowane maszyny i urządzenia. W przodujących gospodarczo i technicznie krajach maleją zasoby siły roboczej, efektywność wytwarzania jest coraz większa, na każdym kroku wprowadza się optymalizację kosztów produkcji przy zapewnieniu satysfakcjonującej jakości produktu i usług, spełniającej wymagania w zakresie ochrony środowiska. Wymienione wyżej zjawiska i procesy to główne cechy społeczne, ekonomiczne i gospodarcze obecnej rzeczywistości w skali globalnej w krajach rozwiniętych technicznie i gospodarczo.

Pierwsza rewolucja przemysłowa wprowadziła mechanizację do produkcji, druga w życie gospodarcze i codzienność wprowadziła elektryczność. W latach 70. XX wieku miała miejsce trzecia rewolucja, która rozwinęła procesy produkcyjne i przyniosła technologie informatyczne [79, 88, 144, 161, 162]. Historycznie rzecz ujmując, pierwsze trzy rewolucje zostały rozpoznane, opisane i wstępnie zanalizowane już po fakcie ich nastania. Obecnie, zupełnie inaczej niż poprzednio, termin Industrie 4.0 (Przemysł 4.0) opisuje rewolucję jeszcze przed jej nastaniem, inspirując przy tym jej wprowadzenie.

Czynnikami umożliwiającymi powyższe zmiany są nowości techniczne, wśród których pierwszoplanową rolę odgrywa technika cyfrowa i informatyka. Dzięki rozwojowi techniki rzeczywistością staje się funkcjonowanie systemów cyberfizycznych, w których proces wytwarzania jest prowadzony jednocześnie w dwóch warstwach: fizycznej i wirtualnej. Wprowadzeniu zmian sprzyja, a wręcz je wymusza, zaawansowana automatyzacja i robotyzacja środków produkcji oraz nowy poziom komunikacji wzajemnej i komunikacji człowiek – maszyna [79, 88, 144, 161, 162].

Czwarta rewolucja przemysłowa ma zaspokoić indywidualne wymagania i aspiracje klientów, a także umożliwić rozwiązanie podstawowych oczekiwań i żądań ogółu konsumentów i nabywców, polegających na uzyskaniu większej produktywności i wydajności „na każdym etapie” działalności człowieka. Ma ona również wspierać współpracę między ludźmi i maszynami. Czwarta rewolucja przemysłowa w ramach obszarów: nauka, technologia i społeczeństwo spowoduje, że znajdą się one w cyklicznej relacji między sobą i będą wzajemnie na siebie korzystnie i twórczo wpływać. W przyszłości przewiduje się, że technologie automatyzujące część naszego ludzkiego intelektu



Rys. 1. Przykładowy sterownik w procesie grzania i jego otoczenie



Rys. 2. Przykładowy zespół maszynowy – wentylator powietrza i jego otoczenie



Rys. 3. Przykładowy zespół maszynowy – turbogenerator i jego otoczenie

staną się podstawą przyszłego rozwoju. W tym społeczeństwie przyszłości ludzie i maszyny będą działali w harmonii, wykorzystując na co dzień sztuczną inteligencję [79, 88, 144, 161, 162]. Ta rewolucja niesie ze sobą potencjał ogromnych zmian. Przewiduje się, że nastąpi geometryczny wzrost przetwarzania danych. Jednocześnie ogrom przyszłych potrzeb można sobie wyobrazić, spoglądając na wykładniczy wzrost liczby połączonych ze sobą rzeczy w codziennym bytowaniu człowieka [79, 88, 144, 161, 162].

Przemysł 4.0 jest często traktowany jako pojęcie teoretyczne, abstrakcyjne, stąd też korzystnie jest przedstawić w rozważaniach jego podstawy na przykładach praktycznych, znanych autorom monografii – rys. 1–3. Weźmy jako przykład trzy

obiekty przemysłowe: sterownik, wentylator powietrza i turbogenerator, które udostępniają swoją reprezentację wirtualną w systemie IT (z ang. *Information Technology* – technologia informatyczna).

Sterownik z rys. 1 to prosty sterownik wykorzystywany w procesie grzania, wyprodukowany w trakcie w pełni monitorowanego procesu produkcyjnego. Jeśli powiążemy go z numerem seryjnym i utworzymy dla niego kod QR<sup>1</sup>, będziemy mogli go zidentyfikować cyfrowo. Zeskanowanie kodu umożliwi uzyskanie informacji o miejscu, czasie i sposobie produkcji sterownika oraz o drodze, jaką przebył on do urządzenia końcowego. Sterownik będzie można wykorzystać np. w całkowicie cyfrowej linii produkcyjnej, ewentualnie w innej rzeczywistości technicznej, gdzie jego kod będzie skanowany po zainstalowaniu w istniejącej strukturze elektroniczno-informatycznej. Informacje o jego czasie pracy, parametrach, producencie i dostawcy będą dostępne w systemie. Istniejący system diagnostyczny i kontrolny będzie mógł rejestrować jego działanie i oceniać stan techniczny, tak aby przewidzieć pozostały czas eksploatacji sterownika (*predictive maintenance*) i zapewnić bezpieczeństwo oraz ciągłość funkcjonowania procesu technologicznego, w którym bierze udział. Kiedy prognoza wskaże zwiększone ryzyko awarii, system będzie mógł automatycznie zamówić urządzenie zastępcze. Nowy sterownik będzie można zainstalować w trakcie najbliższej konserwacji urządzenia grzewczego, unikając zbędnego przestoju i strat w produkcji w przypadku awarii.

Przykładowy sterownik, zespół maszynowy – wentylator powietrza czy turbogenerator w połączeniu z jego cyfrową, wirtualną reprezentacją – można uznać za system cyberfizyczny<sup>2</sup> (ang. *cyberphysical system*, CPS), stanowiący jeden z podstawowych elementów koncepcji Przemysłu 4.0. Jest to wirtualna reprezentacja urządzenia fizycznego. Takie elementy można umieszczać w bardziej złożonych strukturach – np. w linii produkcyjnej, systemie zasilania, systemie dystrybucji.

W ocenie autorów nasz kraj ani gospodarczo, ani technicznie na pewno w ogólności nie jest w fazie czwartej rewolucji przemysłowej. Dają się natomiast zauważyć symptomy tego, że jesteśmy niekiedy w fazie przemysłu 3.0, aczkolwiek nie są powszechne. Świadczą o tym niektóre nowoczesne technologie i wdrożenia w krajowym przemyśle i energetyce. Niestety w wielu zakładach przemysłowych problemem jest ich zwykłe funkcjonowanie na „poziomie przemysłu 3.0÷2.5”. Problemem jest zwyczajne zapewnienie ruchu danego zakładu, tzw. utrzymanie ruchu (działania o charakterze technicznym i organizacyjnym mające na celu zapewnienie wykonywania funkcji zadanych urządzeniom i maszynom danego zakładu przemysłowego). Przykładowy zakład przemysłowy powinien funkcjonować, produkować i sprzedawać swoje wyroby czy usługi. W ogólności można mówić o zagadnieniu utrzymania ruchu w przemyśle. Muszą funkcjonować wszystkie maszyny i urządzenia produkujące: i sterownik, i wentylator powietrza, i turbogenerator.

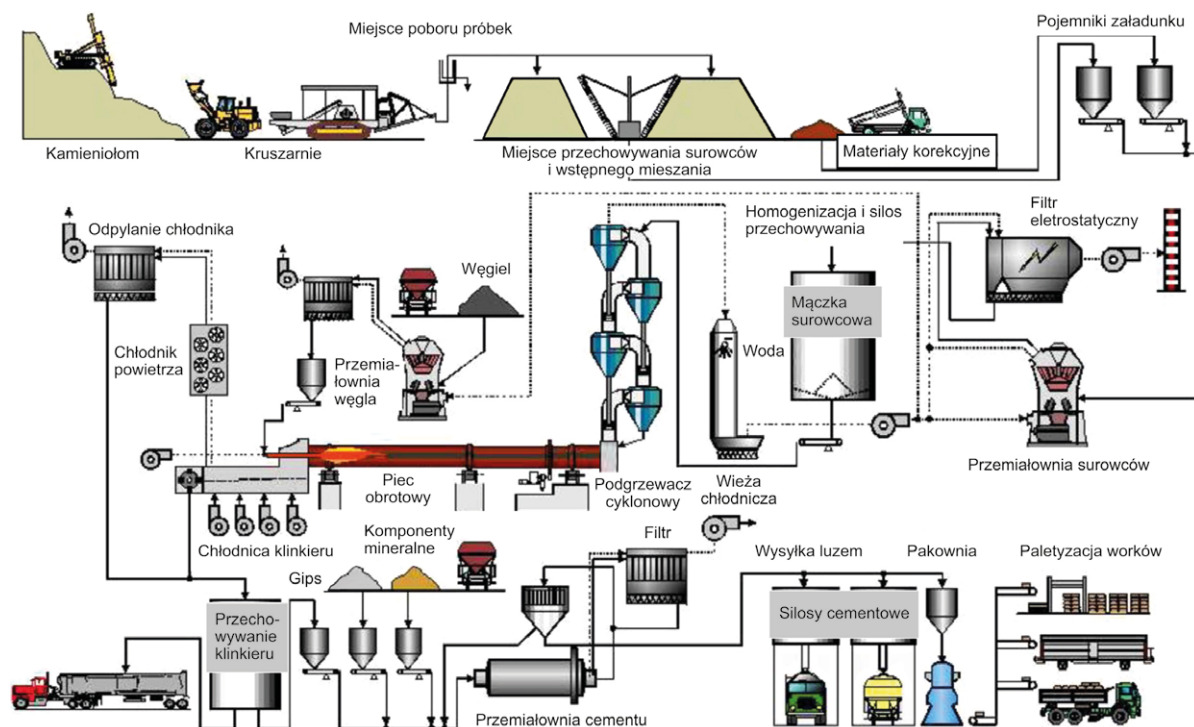
W utrzymaniu ruchu w przemyśle bardzo ważną rolę odgrywa system informatyczny zakładu, jego zabezpieczenia cybernetyczne oraz system diagnostyczno-kontrolny. Odgrywają one podstawową rolę w funkcjonowaniu oraz w ocenie stanu technicznego przykładowego sterownika, wentylatora powietrza czy

turbogenerators. Systemy te sterują urządzeniem, umożliwiając jego bezpieczną eksploatację i prowadzą diagnostykę eksploatacyjną nadzorowanego komponentu (przykładowego sterownika, wentylatora powietrza, turbogenerators).

W wielu przypadkach, szczególnie w zakładach o ruchu ciągłym (przemysł, energetyka, komunikacja, transport, łączność), gdzie awaryjne zatrzymanie zespołu maszynowego, komputera, serwera czy innego newralgicznego komponentu technicznego może doprowadzić do olbrzymich strat czy wręcz katastrofy technicznej i społecznej, ogromne znaczenie ma diagnostyka techniczna eksploatacyjna używanej przez człowieka infrastruktury technicznej. Pozwala ona wykryć początek uszkodzenia, początkowe symptomy uszkodzenia, zanim rozszerzy się ono do rozmiarów mogących spowodować awarię. Diagnostyka eksploatacyjna umożliwia wczesne dostrzeżenie niekorzystnych zmian zachodzących w używanej przez człowieka infrastrukturze technicznej, ustalenie ich przypuszczalnych źródeł i usunięcie przyczyn. Diagnostyka może być prowadzona offline, czujnikami diagnostycznymi i mobilną aparaturą diagnostyczno-kontrolną, a w wersji zaawansowanej – online – czujnikami diagnostycznymi i aparaturą diagnostyczno-kontrolną, stacjonarną, nazywaną bardzo często systemem monitoringu.

Krajowe piśmiennictwo techniczne dotyczące utrzymania ruchu w przemyśle [142, 143, 234, 241, 325] jest, w ocenie autorów, poświęcone zagadnieniom teoretycznym i wąskim zagadnieniom praktycznym. Niewiele jest pozycji traktujących kompleksowo kwestie utrzymania ruchu w danym zakładzie przemysłowym. Zagadnienie utrzymania ruchu w przykładowej krajowej elektrowni wraz z wiążącymi się z tym problemami przedstawiono w pracy doktorskiej Józefa Dwojaka [53]. Autor w pracy przeanalizował utrzymanie ruchu, sposób eksploatacji i stan diagnostyki w krajowych elektrowniach ciepłych, w szczególności w czterech elektrowniach o mocach bloków 360 MW i 200 MW. Krytyczna analiza doprowadziła do opracowania koncepcji utrzymania ruchu w elektrowni, opracowania nowej technologii diagnostyki eksploatacyjnej zespołów maszynowych w elektrowni ciepłej na przykładzie PGE Elektrowni „OPOLE” SA. Opracowana technologia diagnostyki eksploatacyjnej miała doprowadzić i doprowadziła przede wszystkim do zwiększenia niezawodności pracy elektrowni, do wyraźnego zmniejszenia awaryjności wszystkich maszyn. Technologia ta zmienia sposób eksploatacji, zabezpieczenia i zarządzania maszynami w energetyce krajowej. Praca jest technologicznym wzorcem dla krajowych przedsiębiorstw energetycznych, które decydują się na wprowadzenie kompleksowego programu diagnostyki, zabezpieczenia i zarządzania maszynami. Zagadnieniu tym poświęcona jest również monografia [54].

Zagadnienie utrzymania ruchu w przykładowej krajowej cementowni z problemami w utrzymaniu ruchu przedstawiono w pracy doktorskiej Marka Kacperaka [114]. Zagadnieniu temu poświęcone są prace [115, 116] oraz niniejsza monografia. Rozwiązania podane w pracach [115, 116] oraz w monografii wprowadzono z bardzo dobrym skutkiem w praktyce przemysłowej. Niniejsza monografia przedstawia w głównej mierze utrzymanie ruchu w przemyśle, a jako przykład praktyczny wybrano Cementownię „ODRA” SA.



Rys. 4.  
Schemat  
procesu  
produkcji  
cementu  
[131]

## 2. Produkcja cementu

Produkcję cementu poglądowo przedstawiono na rys. 4. Podstawowymi składnikami cementu są: kamień wapienny, glina i margiel. Wydobywane są w kopalniach metodą strzałową lub poprzez zastosowanie ciężkiego sprzętu mechanicznego. Powstały w ten sposób urobek za pomocą samochodów technologicznych transportowany jest do łamiarni, gdzie jest poddawany wstępnemu kruszeniu. Rozdrobniony surowiec jest transportowany przenośnikami taśmowymi do składu surowca. Jako dodatki do cementów stosuje się między innymi krzemionkę oraz rudę żelaza. Mieszanka surowcowa mielona jest w młynach rolowo-misowych lub rurowo-kulowych do momentu osiągnięcia pożądanej wielkości ziarna surowca. Po zmieleniu materiał gromadzony jest w zbiornikach mączki surowcowej w celu jego ujednorodnienia [131, 137]. Wypalanie klinkieru jest najważniejszą częścią procesu z punktu widzenia podstawowych kwestii ochrony środowiska związanych z produkcją cementu. Do wyprodukowania 1 tony klinkieru w UE zużywa się przeciętnie 1,52 tony surowców. Na różnicę tych wielkości składa się w większości strata z procesu w postaci dwutlenku węgla emitowanego do powietrza podczas reakcji kalcynacji [131].

Ogólnie specyfika procesu wypalania klinkieru umożliwia użycie odpadów w charakterze surowca lub paliwa. Klinkier wypala się w piecu obrotowym w temperaturze ok. 1450°C, metodą mokrą lub suchą w długim piecu, bądź metodą półmokrą lub półsuchą. W 2008 roku ok. 90% europejskiej produkcji cementu pochodziło z pieców działających metodą suchą, kolejne 7,5% produkcji odbywało się w piecach pracujących metodą półsuchą lub półmokrą, a reszta produkowanego w Europie cementu, ok. 2,5%, pochodziła z pieców na metodę mokrą. Generalnie przewiduje się, że działające w Europie piece metody mokrej zostaną w ramach modernizacji przekształcone w instalacje pracujące metodą suchą, podobnie jak piece metody półsuchej

i półmokrej [131]. Po wypale klinkier jest schładzany i składowany w silosach. Następnie klinkier przemiała się z gipsem i innymi składnikami i uzyskuje się drobny proszek – cement [131]. Schemat technologiczny produkcji cementu przedstawia rys. 4 [131].

## 3. Eksploatacja maszyn

Pod pojęciem eksploatacja maszyn i urządzeń rozumie się [143, 241]:

- prowadzenie ruchu tych maszyn i urządzeń;
- utrzymanie maszyn i urządzeń w należytym stanie technicznym.

Do czynności związanych z prowadzeniem ruchu maszyn i urządzeń są zaliczane [143, 241]:

- uruchamianie maszyn i urządzeń;
- obsługa w czasie pracy;
- zatrzymanie maszyn i urządzeń w czasie normalnej pracy i w stanie awaryjnym;
- prowadzenie zapisów ruchowych.

Prace związane z utrzymaniem maszyn i urządzeń w należytym stanie technicznym obejmują: oględziny, przeglądy, konserwacje i naprawy oraz prace kontrolno-pomiarowe umożliwiające ocenę ich stanu technicznego [143, 241].

W eksploatacji można wyróżnić [143, 241]:

- użytkowanie;
- obsługiwanie.

Użytkowanie to „wykorzystywanie obiektu technicznego zgodnie z jego przeznaczeniem i właściwościami funkcjonalnymi w celu zaspokojenia potrzeb ludzkich” [143, 241].

Obsługiwanie polega na „utrzymywaniu obiektu w stanie zdatności oraz przywracaniu obiektowi technicznemu wymaganych właściwości funkcjonalnych przez przeglądy, regulacje, konserwacje, naprawy i remonty” [143, 241].

Każda maszyna i urządzenie powinny podczas eksploatacji realizować cele, dla których zostały zaprojektowane. Ich przydatność dla potrzeb człowieka nazywa się jakością eksploatacyjną, która jest zbiorem istotnych cech określających stopień spełnienia wymagań odbiorcy [143, 241].

Efektywne działanie maszyn i urządzeń jest uzależnione od ich niezawodności oraz od jakości działań ludzi, którzy je eksploatują. Jakość maszyn i urządzeń ocenia się, sprawdzając ich cechy techniczno-użytkowe. W 1987 roku ustanowiono międzynarodowe normy ISO 9000, definiujące modele zapewniające jakość w projektowaniu, produkowaniu, instalowaniu i serwisie oraz badaniu maszyn i urządzeń.

Najważniejsze cechy techniczno-użytkowe maszyn i urządzeń to: przeznaczenie, wielkości charakterystyczne, wyposażenie, wydajność, dokładność, niezawodność, ergonomiczność oraz bezpieczeństwo i higiena pracy.

Na obsługę maszyn i urządzeń składają się [143, 241]:

- **przeгляд techniczny** – obejmuje czynności związane z regulacją zespołów i mechanizmów, usunięciem usterek i uszkodzeń, myciem i czyszczeniem, ustaleniem stopnia zużycia poszczególnych części i zespołów w celu określenia szczełowego zakresu naprawy [143, 241];
- **naprawa bieżąca** – obejmuje naprawę lub wymianę szybko zużywających się części; w zakres naprawy bieżącej wchodzi również wszystkie czynności przeglądu technicznego [143, 241];
- **naprawa średnia** – to naprawa lub wymiana szybciej zużywających się części zespołów w celu zapewnienia prawidłowej eksploatacji maszyny lub urządzenia do następnej naprawy średniej lub głównej; naprawa średnia obejmuje również wszystkie czynności naprawy bieżącej [143, 241];
- **naprawa główna** – obejmuje naprawę lub wymianę wszystkich części, a nawet całych zespołów ulegających zużyciu, w celu przywrócenia pierwotnej lub zbliżonej do pierwotnej wartości użytkowej maszyny lub urządzenia [241].

Ogólne zasady prawidłowej eksploatacji maszyn są opisane w literaturze, np. [35, 44, 53, 54, 79, 116, 120, 123, 180, 196, 266]. Pozycje najbardziej przydatne do praktycznego stosowania to wskazania producentów maszyn zawarte w tzw. *Dokumentacji techniczno-ruchowej*. Należy również pamiętać o stosownych normach oraz przepisach eksploatacji maszyn wydawanych przez upoważnione instytucje, organizacje techniczne bądź właścicieli i użytkowników.

Współcześnie, w okresie stale rosnących wymagań dotyczących wydajności oraz redukcji kosztów produkcji w przemyśle, koniecznością staje się właściwa diagnostyka maszyn i urządzeń. Ogólnie uważa się, że prowadzenie diagnostyki jest korzystne, ponieważ:

- zapewnia niezawodność maszyn i urządzeń;
- daje oszczędności dzięki zmniejszeniu kosztów ewentualnych napraw diagnozowanych maszyn i urządzeń;
- minimalizuje straty produkcyjne związane z realizowanym procesem technologicznym, w którym uczestniczą maszyny i urządzenia.

Często uszkodzenia niewielkich elementów maszyn i urządzeń skutkują znacznymi stratami wynikającymi z nieprzewidzianego zatrzymania procesu produkcyjnego oraz nieplanowych

prac remontowych. Prowadząc na bieżąco diagnostykę maszyn i urządzeń oraz monitorując parametry ich pracy, można uniknąć skutków awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas eksploatacji maszyn i urządzeń [79].

Bezpieczeństwo eksploatacji, dyspozycyjność oraz trwałość i niezawodność maszyn oraz urządzeń wykorzystywanych w procesie produkcyjnym mają decydujący wpływ na kondycję ekonomiczną przedsiębiorstwa [79, 266]. Znaczne straty produkcyjne mogą być skutkiem nieprzewidzianych awarii maszyn i urządzeń, a w konsekwencji postoju maszyn. Do tego dochodzą często bardzo kosztowne naprawy. Konieczne jest dysponowanie na bieżąco informacjami o zmianach stanu dynamicznego maszyn i urządzeń, o stopniu zaawansowania ich zużycia, rodzaju i poziomie uszkodzeń, aby zapobiec nieprzewidzianym awariom i w miarę możliwości wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze. Prowadzenie eksploatacji maszyn i urządzeń opartej tylko na obserwacji przez obsługę jest niewystarczające. Diagnostyka maszyn i urządzeń oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwalają uniknąć awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów oraz znacznie wydłużyć czas ich eksploatacji. Organizacyjna i finansowa atrakcyjność diagnostyki oraz ciągły postęp w elektronice i dostępność do niej zachęcają do intensywnego stosowania diagnostyki maszyn.

W ujęciu ogólnym zespoły maszynowe i urządzenia można eksploatować na różne sposoby [27–31, 79, 266]:

- eksploatacja do wystąpienia awarii;
- eksploatacja planowo-zapobiegawcza;
- eksploatacja zależna od stanu maszyn i urządzeń;
- eksploatacja będąca połączeniem planowo-zapobiegawczej oraz zależnej od stanu maszyn i urządzeń.

Takie ujęcie zagadnienia eksploatacji maszyn i urządzeń określa jednocześnie metody ich remontów. Wyróżnia się w związku z tym [27–31, 79, 266]:

- remont poawaryjny;
- remont zapobiegawczy uwarunkowany okresem eksploatacji;
- remont uwarunkowany stanem technicznym;
- remont uwarunkowany okresem eksploatacji i stanem technicznym.

W metodzie eksploatacji zależnej od stanu technicznego każdy zespół maszynowy i urządzenie są traktowane w sposób indywidualny. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, lecz uwarunkowany stanem technicznym zespołu maszynowego i urządzenia. Remont przeprowadza się tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne, a stan techniczny zespołu maszynowego i urządzenia określa się indywidualnie.

Spółród nowoczesnych metod badań diagnostycznych należy wyróżnić bardzo efektywne badania oparte na wykorzystaniu informacji zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn i urządzeń. Sygnałami tymi są między innymi sygnały wibroakustyczne, które towarzyszą każdemu procesowi wytwórczemu i eksploatacyjnemu. Informują one o procesach dynamicznych zachodzących w maszynach i urządzeniach w zakresie drgań strukturalnych i zjawisk akustycznych, których częstotliwość leży w granicach od ułamka Hz do kilkudziesięciu

MHz. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój i określać trend zmian – rys. 5.

Ocenę aktywności drganiowej zespołu maszynowego i urządzeń można wykonać z wykorzystaniem stosownych obowiązujących norm lub sprawdzonych i zalecanych kryteriów [27–31, 79, 216–229, 266]. Wyniki pomiarów drgań można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania zespołu maszynowego bądź urządzenia. 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.

Eksploatacja zespołów maszynowych i urządzeń zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowadzenia eksploatacji 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 [27–31, 79, 216–229, 266]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [27–31, 79, 216–229, 266], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania. W krajowych zakładach przemysłowych przed przejściem z eksploatacji planowo-zapobiegawczej do eksploatacji zależnej od stanu maszyn i urządzeń 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 i urządzeń.

Eksploatację planowo-zapobiegawczą prowadzi się najczęściej w zakładach, w których nie wszystkie ważne napędy są zdublowane, lub tam, gdzie nieplanowane zatrzymanie produkcji może powodować bardzo duże straty ekonomiczne i społeczne. Produkcję w takich zakładach zatrzymuje się w ściśle określonych terminach, a następnie prowadzi się remont zapobiegawczy. Jest to na przykład raz w roku.

Wskaźnik awaryjności wielu maszyn i urządzeń nie zmniejsza się w wyniku wymiany określonych części, np. łożysk, uszczelnień, pasków, łańcuchów. Bardzo często po takim remoncie, jak pokazuje praktyka przemysłowa, przynajmniej przez jakiś czas awaryjność maszyn i urządzeń wzrasta (wskutek niefortunnej ingerencji remontowca w maszyny i urządzenia). Pogorszenie się stanu technicznego danej maszyny i urządzenia jest sprawą bardzo indywidualną i nie da się ściśle na sztywno określić dla wszystkich maszyn i urządzeń (jednakowo) okresu bezawaryjnej ich eksploatacji. Okresy międzyremontowe są często określane statystycznie jako takie, podczas których oczekuje się, że nie więcej jak np. 2% maszyn i urządzeń nowych lub w pełni wyremontowanych ulegnie awarii. W eksploatacji planowo-zapobiegawczej bardzo często oddaje się do remontu maszyny i urządzenia, które tego remontu nie wymagają. Remont zapobiegawczy maszyn i urządzeń przy eksploatacji planowo-zapobiegawczej jest bardzo często technicznie i ekonomicznie nieuzasadniony.

Eksploatacja maszyn i urządzeń zależna od ich stanu technicznego jest strategią technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych. W gospodarce krajów o dużej kulturze technicznej jest strategią dominującą. Strategia ta, obok korzyści ekonomicznych typu: wydłużenie okresów międzyremontowych, zwiększenie niezawodności maszyn i urządzeń, zwiększenie wydajności, eliminacja niepotrzebnych wymian podzespołów, skrócenie czasu napraw, zmniejszenie kosztów magazynowych, 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 [27–31, 79, 216–229, 266]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [27–31, 79, 216–229, 266], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania.

#### 4. Utrzymanie ruchu maszyn i urządzeń

Utrzymanie ruchu jest terminem odnoszącym się do teorii, metod, technologii oraz technik, które są stosowane w celu zapewnienia sprawnego funkcjonowania maszyn i urządzeń [142, 143, 234, 241, 325].

Cele utrzymania ruchu są następujące [142, 143, 234, 241, 325]:

- osiągnięcie pożądanej jakości wyrobów lub usług;
- maksymalizacja ekonomicznego okresu użytkowania wyposażenia produkcyjnego;
- utrzymanie warunków bezpiecznej eksploatacji;
- maksymalizacja zdolności produkcyjnych oraz minimalizacja kosztów produkcji poprzez zapewnienie nielicznych przerw w procesie produkcji.

Zagadnienie utrzymania ruchu w danym przedsiębiorstwie musi być rozpatrywane w kontekście jego kondycji ekonomicznej. Na całkowity koszt produkcji w przedsiębiorstwach produkcyjnych wpływa wiele składników. Do podstawowych należą koszty materiałowe w procesie produkcji, koszty pracy, koszty eksploatacji maszyn i urządzeń, w tym koszty ich używania i serwisowania. Koszty te korelują z zapewnieniem oczekiwanej nieustannej dyspozycyjności, gwarantującej ciągłość produkcji [177]. Sytuacja konkurencyjna, w jakiej znajduje się przemysł, zmusza przedsiębiorstwa do intensywnego poszukiwania możliwości zmniejszenia udziału bezpośrednich kosztów utrzymania ruchu w kosztach zmiennych przedsiębiorstwa [143]. Rośnie nie tylko znaczenie samego utrzymania urządzeń w sprawności eksploatacyjnej, ale rosną także koszty utrzymania tej sprawności. Koszty utrzymania ruchu stanowią 4–13% obrotu (w zależności od branży) [143]. Obszar wszelkich działań w przedsiębiorstwie umożliwiających ciągłość w produkcji jest wyrazem realizacji przyjętej strategii eksploatacyjnej przedsiębiorstwa [143].

Optymalną metodą eksploatacji maszyn jest metoda eksploatacji zależna od ich stanu technicznego. Remont maszyny przeprowadza się tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Jedną z możliwych dróg obniżenia kosztów działalności w przedsiębiorstwach 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 ich stanu dynamicznego. System taki w połączeniu z odpowiednimi torami pomiarowymi pozwala zrealizować pełny nadzór zespołów maszynowych. Informacja o szybkości zmian stanu technicznego umożliwia określenie przewidywanego czasu niezbędnego do dokonania naprawy maszyny, w wielu sytuacjach zakresu takiej naprawy, a zatem w konsekwencji czasu potrzebnego 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, wybór do eksploatacji maszyn o najlepszym stanie technicznym, planowanie 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 informacje o stanie maszyn.

W opinii licznych praktyków zajmujących się diagnostyką maszyn i urządzeń w przemyśle uzasadnione organizacyjnie i ekonomicznie jest utrzymanie nadzoru diagnostycznego (Wydziałów Diagnostyki lub Wydziałów Diagnostyki i Kontroli Jakości) maszyn i urządzeń w strukturach właścicielskich przedsiębiorstwa [53, 54].

Współczesne koncepcje utrzymania ruchu, czyli systemy prognostyczne, doceniają znaczenie przeglądów i remontów [86, 142, 143]. Mówiąc o nich, ma się również na myśli:

- narzędzia do wspierania decyzji: ocena ryzyka, modele intensywności uszkodzeń i analiza ich efektów oraz systemy ekspertowe;
- nowe techniki utrzymania ruchu, np. monitorowanie stanu;
- zmiany w sposobie myślenia o organizacji – współuczestnictwo i praca zespołowa;
- usuwanie usterek i awarii;
- zapobieganie usterkom i awariom.

Do najważniejszych współczesnych koncepcji utrzymania ruchu zaliczyć należy [142, 143, 234, 325]:

- RCM (*Reliability Centered Maintenance*) – utrzymanie ruchu skierowane na niezawodność – strategia wg niezawodności;
- TPM (*Total Productive Maintenance*) – całościowe utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność – utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją.

RCM ma na celu osiągnięcie poziomu niezawodności, który jest spójny z bezpieczeństwem, aspektami środowiskowymi, kosztami operacyjnymi oraz celami biznesowymi przedsiębiorstwa [234]. Strategia remontowa RCM opiera się na odpowiedziach na 7 pytań:

1. Jaka jest funkcja instalacji bądź maszyny?
2. Jaka utrata funkcji następuje w momencie awarii?
3. Jakie są przyczyny każdej utraty funkcji?
4. Co się dzieje w momencie każdej awarii?
5. Jakie są konsekwencje każdej awarii?
6. Co zrobić, aby zapobiec awarii lub ją przewidzieć?
7. Co należy zrobić, gdy nie ma możliwości zapobieżenia awarii?

Strategia RCM jest z sukcesem wdrażana w wielu zakładach przemysłu i energetyki w kraju, m.in. w GDF Suez Energy Polska oraz w Elektrowni Połaniec [234]. RCM jest wykorzystywany do budowy w danym zakładzie przemysłowym systemu utrzymania ruchu od podstaw. Szczególne znaczenie podczas wdrażania RCM przypisuje się pracy zespołowej. W pracach związanych z utrzymaniem ruchu muszą brać udział operatorzy maszyn i urządzeń [143].

TPM jest koncepcją utrzymania ruchu polegającą na wprowadzeniu autonomicznego utrzymania ruchu maszyn i urządzeń przez operatorów. Musi dojść do integracji procesu produkcji z procesem obsługowym. Do obowiązków operatorów należą wówczas [143]:

- konserwacja;
- czynności inspekcyjne;
- proste prace naprawcze;
- współdziałanie z obsługą remontową podczas przestoju maszyn i urządzeń.

System utrzymania ruchu TPM stosuje z powodzeniem koncern Toyota.

W literaturze specjalistycznej [142, 143] opisano inne współczesne sposoby utrzymania ruchu maszyn i urządzeń w przemyśle i energetyce.

## 5. Diagnostyka eksploatacyjna maszyn w przemyśle

Wskutek wzrastającej wartości maszyn i urządzeń w przemyśle uwaga służb utrzymania ruchu i służb eksploatacyjnych jest skierowana na unowocześnianie zasad eksploatacji i serwisu wyposażenia technicznego. W wielu krajach technicznie i ekonomicznie wysoko rozwiniętych, w tym również coraz częściej i u nas, dostrzega się znaczące źródło efektów ekonomicznych, które daje przyjęcie zasad eksploatacji maszyn uzależnionych od ich stanu technicznego. Odchodzi się od zasad eksploatacji „do awarii” oraz zasad uwzględniających normatywy czasu pracy. Wprowadza się diagnostykę, bieżący nadzór oraz monitorowanie stanu technicznego maszyn i urządzeń. Intensywnie rozwijający się przemysł, zwłaszcza w ostatnich latach, wytwarza coraz to bardziej skomplikowane maszyny i urządzenia i korzysta z nich. Stawiane są żądania wysokiej efektywności i niezawodności. Od inżynierów żąda się maksymalnego skrócenia i potaniania procesu wytwarzania danego produktu oraz jak najdłuższego utrzymywania maszyn i urządzeń produkcyjnych w stanie zdatności do prawidłowego działania. Pociąga to za sobą konieczność opracowania i ciągłego udoskonalania metod umożliwiających zbieranie oraz analizowanie informacji o właściwościach funkcjonujących maszyn oraz o ich stopniu zdatności do wykonywania przewidzianych przez inżynierów zadań. Można powiedzieć, że są co chwilę stawiane pytania: jaki jest stan techniczny maszyny, jak się ona zachowuje, czy ma jakieś uszkodzenia? Efektywna organizacja procesów zmierzających do odpowiedzi na te pytania jest podstawowym zadaniem diagnostyki technicznej [35, 36]. Przesłanki [35, 36, 266] do obiektywnej oceny stanu danej maszyny dają pomiary dostępnych do obserwacji symptomów (objawów) stanu technicznego, a na podstawie otrzymanych danych wyciąga się wnioski.

Symptom stanu jest opisany trzema grupami parametrów i charakterystyk możliwych do obserwacji. Są to:

- parametry funkcjonalne, robocze maszyny elektrycznej (np. moc, prędkość, prąd);
- parametry i charakterystyki będące bezpośrednim symptomem zużycia (np. luzy, odchyłki kształtu i wymiarów w stosunku do wzorca);
- parametry procesów resztkowych (np. drgań, hałasu, strumienia osiowego, wyładowań niezupełnych).

Każda maszyna przechodzi cztery fazy swego istnienia: konstruowanie, wytwarzanie, eksploatację i złomowanie, rys. 5 [266]. Na etapie każdego z nich należy prowadzić stosowną diagnostykę. Na podstawie analizy sygnałów generowanych przez maszyny i urządzenia określa się ich stan, przewidując przy tym terminy koniecznych przeglądów i remontów, rys. 6.

Spośród nowoczesnych metod badań diagnostycznych maszyn należy wyróżnić bardzo efektywne badania oparte na wykorzystaniu informacji zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn. Sygnałami tymi są m.in. sygnały wibroakustyczne, które towarzyszą każdemu procesowi wytwórczemu i eksploatacyjnemu. 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 [10, 11, 35, 36, 150, 151, 176, 216–229, 266]. Sygnały wibroakustyczne towarzyszące pracy maszyn, jak wykazują badania [10, 11, 35, 36, 150, 151, 176, 216–229, 266], stanowią odbicie najistotniejszych zjawisk fizycznych zachodzących w maszynach, takich jak odkształcenia i naprężenia, współdziałanie poszczególnych części i podzespołów maszyn, stany przedawaryjne i awaryjne. Od przebiegu tych procesów w sposób zasadniczy zależy zdolność maszyn do prawidłowego ich funkcjonowania.

Sygnał wibroakustyczny towarzyszący pracy danej maszyny przedstawia swoiste odwzorowanie stanu technicznego maszyny. Przyjmuje się [10, 11, 35, 36, 150, 151, 176, 216–229, 266], że aby sygnał mógł być wykorzystany jako nośnik informacji o stanie maszyny, musi istnieć jednoznaczna relacja pomiędzy stanem maszyny a strukturą sygnału. Niech  $x$  będzie wektorem w przestrzeni  $P$ -wymiarowej i niech odwzorowuje przez swoje składowe stopnie swobody źródła sygnału wibroakustycznego (np. maszyny elektrycznej) [10, 11].

$$x = \text{col} (x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_p) \quad (1)$$

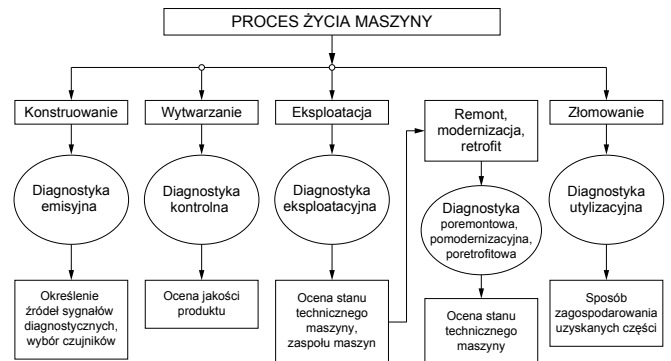
gdzie: col – oznaczenie wektora kolumnowego.

Zmiana stanu źródła może być procesem ciągłym lub skokowym. Zmianę stanu maszyny elektrycznej jako źródła wibroakustycznego w czasie  $t_1$  i  $t_2$  określa wyrażenie:

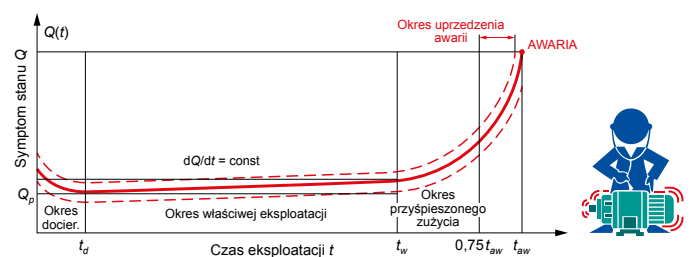
$$x(t_1) = x(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx}{dt} dt = \left( \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_1}{dt} dt, \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_2}{dt} dt, \dots, \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_p}{dt} dt \right) \quad (2)$$

gdzie:  $x(t_1), x(t_2)$  – stany źródła wibroakustycznego w chwilach  $t_1, t_2$ ;  $\frac{dx}{dt}$  – prędkość zmiany stanu źródła wibroakustycznego.

Miarą zmiany stanu źródła może być iloczyn skalarny



**Rys. 5.** Cele diagnostyki na poszczególnych etapach „życia” maszyny elektrycznej



**Rys. 6.** Idea diagnostyki eksploatacyjnej maszyn – krzywa „życia maszyn”

wektorów  $x(t_1)$  i  $x(t_2)$  lub odległość metryczna w przestrzeni  $P$ -wymiarowej, np.:

$$d[x(t_1), x(t_2)] = \left[ \sum_{p=1}^P (x(t_{1,p}) - x(t_{2,p}))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Aby sygnał wibroakustyczny  $u$  mógł odwzorowywać stan maszyny elektrycznej jako obiektu rozpoznawalnego, układ równań (3) musi spełniać warunek rozpoznawalności, tzn.:

$$x(t_1) = \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (4)$$

$$x(t_2) = \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (5)$$

$$x(t_p) = \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (6)$$

gdzie

$$u = \text{col} (u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (7)$$

Możliwość odwzorowania stanu maszyny jest zależna od cech fizycznych źródła sygnału wibroakustycznego oraz od parametrów samego sygnału. Zakres zastosowań sygnałów wibroakustycznych towarzyszących pracy maszyn, w tym maszyn elektrycznych, do oceny ich stanu jest bardzo duży. Wynika to między innymi z faktu, że procesy wibroakustyczne generujące sygnały wibroakustyczne mają dużą pojemność informacyjną i dużą szybkość przekazywania informacji o stanie dynamicznym maszyny. Z teorii maszyn i z praktyki eksploatacji maszyn wynika, że na ich dynamikę istotny wpływ

wywierają właściwości dynamiczne elementów sprzęgających poszczególne części maszyn oraz elementy maszyn najczęściej ulegające uszkodzeniom. Wynika z tego, że analizując drgania danej maszyny, trzeba zwrócić szczególną uwagę na drgania generowane przez te właśnie elementy. Oznacza to w przypadku analizy drgań silników elektrycznych konieczność określenia właściwości dynamicznych łożysk jako elementów sprzęgających część nieruchomą (stojan, korpus) z częścią ruchomą (wirnikiem). Zdolność do przenoszenia informacji przez sygnał wibroakustyczny o szerokości widma  $\Delta F$  [Hz] i czasie trwania  $T$  [s] zależy od względnego stosunku mocy sygnału użytecznego  $N_s$  do sygnału zakłócającego  $N_n$ . Określa to wzór Shannona [13]:

$$Q = T \Delta F \log_2 (1 + N_s/N_n) \text{ [bit/s]} \quad (8)$$

gdzie:  $Q$  – ilość informacji podawana w bitach.

Szybkość przekazywania informacji określa relacja:

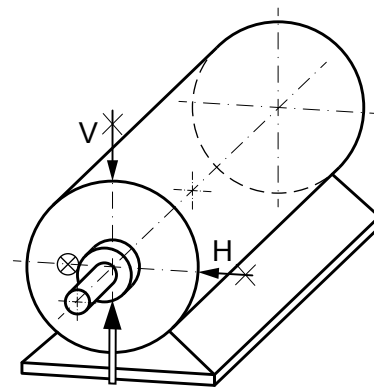
$$C = \frac{Q}{T} = \Delta F \log_2 (1 + N_s/N_n) \text{ [bit/s]} \quad (9)$$

Dla przykładu rozpatrzmy silnik elektryczny klatkowy, będący napędem wentylatora spalin. Załóżmy, że mamy ocenić stan techniczny łożysk tocznych silnika. Obserwację, pomiar i analizę sygnału drganiowego węzłów łożyskowych, a konkretnie przyspieszenia drgań, prowadzimy w paśmie  $F = 0\text{--}40$  kHz w punktach pomiarowych przedstawionych na rys. 7. Załóżmy, że stosunek sygnału użytecznego do sygnału zakłóceń wynosi  $N_s/N_n = 15$ . Korzystając ze wzoru (9), obliczamy  $C = 8 \cdot 10^4$  bit/s. Z przytoczonego przykładu widać, że szybkość przekazywania informacji o stanie łożyska tocznego silnika przez sygnał wibroakustyczny jest bardzo duża. Zrozumiałe jest więc szerokie zastosowanie diagnostyki wibroakustycznej do oceny stanu technicznego maszyn. Powyższy przykład określa również wymagania względem aparatury pomiarowej.

## 6. Symptomy uszkodzeń – zagadnienia ogólne

Określenie sposobu diagnozowania eksploatacyjnego maszyn musi być poprzedzone analizą mechanizmu powstawania danego uszkodzenia, które prowadzi do awarii lub do zatrzymania napędu i wykonania remontu. Trzeba prześledzić możliwą „drogę” powstawania uszkodzenia w układzie napędowym i określić symptomy towarzyszące jego eksploatacji, które będą występowały już na początku pojawienia się uszkodzenia w możliwie najkrótszym czasie podczas eksploatacji napędu. W publikacji [266] przedstawiono szczegółowo powyższe zagadnienie. Zwrócono uwagę na bardzo złożony mechanizm powstawania przydatnych diagnostycznie wielkości fizycznych umożliwiających określenie stanu technicznego napędu, a silnika w szczególności.

Nie sposób ograniczyć się tylko do silnika. Wzajemne oddziaływanie pomiędzy silnikiem, sprzęgłem, maszyną napędzaną oraz fundamentem, konstrukcją wsporczą i elementami mocowania są natury podstawowej i decydują o koniecznym „uogólnionym” sposobie podejścia do diagnostyki eksploatacyjnej wspomnianych silników w przemyśle. Bardzo często o złej pracy



Rys. 7.

Przykładowe punkty pomiaru drgań w silniku: wg norm [190, 191] strzałki pojedyncze i wg propozycji autora – strzałka podwójna [266]

silnika, np. o jego bardzo dużych drganiach, decyduje nie jego stan techniczny, a uszkodzone sprzęgło, niewyważony wentylator czy luz w mocowaniu do fundamentu [266]. Ograniczenie się w rozważaniach tylko do samego silnika nie doprowadziłoby, jak pokazuje praktyka, do pozytywnych rezultatów. Określenie, identyfikacja symptomów umożliwiających przeprowadzenie diagnostyki jest możliwe przy wykorzystaniu eksperymentu diagnostycznego lub na drodze modelowania matematycznego. Każda z tych metod ma swoje silne i słabe strony. Wiele z nich z upływem czasu nie jest stosowanych ze względu na ograniczenia przemysłowe, np. zakłócenia, ograniczenia metrologiczne. Pojawiają się natomiast nowe metody, które są rezultatem najnowszych badań, polegające np. na wykorzystaniu wyładowań niezupełnych do określenia stanu technicznego izolacji uzwojeń silników w warunkach online. Intensywny rozwój elektroniki, zwłaszcza cyfrowej, oraz rozwój technik komputerowych umożliwia budowanie z dostępnych już prawie powszechnie komponentów złożonych układów diagnostycznych, których przydatność można sprawdzać w przemyśle.

## 7. Kryteria oceny stanu dynamicznego maszyn, wartości graniczne pracy maszyn

Ocena intensywności drgań, poziomu ciśnienia akustycznego maszyn, w tym silników elektrycznych nowo wyprodukowanych oraz po remoncie, powinna być wykonana na stacji prób u producenta, w zakładzie remontowym bądź u użytkownika na specjalnym stanowisku badawczym metodami opartymi na obowiązujących normach lub uzgodnionych pomiędzy zainteresowanymi. Ocena maszyn powinna być wiarygodna i jednoznaczna [266].

Ocenę eksploatowanych zespołów maszynowych należy wykonać na podstawie pomiarów bieżących na stanowisku pracy tych zespołów, opierając się na kryteriach oceny stanu technicznego maszyn i ich wartościach granicznych [266].

W Unii Europejskiej tylko normy dotyczące bezpieczeństwa są obowiązkowe (np. w budownictwie), pozostałe są nieobowiązkowe, aczkolwiek zalecane do stosowania.

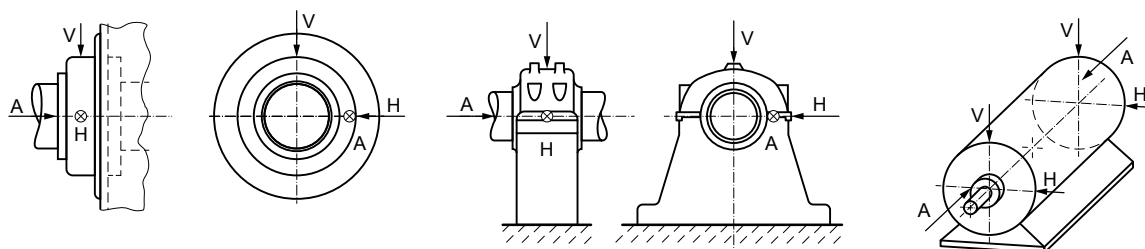
### 7.1. Ocena drganiowa maszyn

Formalne kryteria oceny drgań maszyn i urządzeń są ustalone w normach, które można podzielić na następujące cztery rodzaje [266]:

- normy odbiorcze, określające dla maszyn lub urządzeń dopuszczalny stan wibracyjny, który jest jednym z mierników dokładności wykonania i montażu;



**Rys. 8.** Punkty pomiarowe w silniku poziomym wg norm [190, 191]



- normy eksploatacyjne, definiujące dopuszczalny stan wibracyjny pracujących maszyn i urządzeń;
- normy sanitarne, obligujące do zmniejszenia szkodliwości wpływu drgań maszyn i urządzeń na zdrowie człowieka;
- normy odporności wibracyjnej, wskazujące dopuszczalny poziom drgań pochodzących ze źródeł zewnętrznych, które mogą działać w sposób szkodliwy na maszyny i urządzenia.

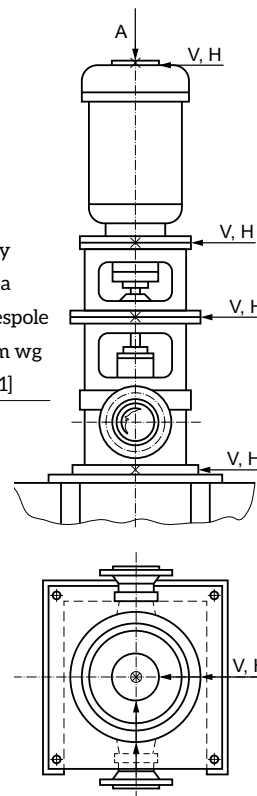
Z upływem czasu obserwuje się systematyczne zaostżenie norm zarówno międzynarodowych, jak i krajowych, powodowane m.in. rozwojem technologii wytwarzania maszyn. Zaostżenie norm ma zachęcić producentów maszyn do poprawy jakości nowych maszyn, a użytkowników do lepszej dbałości o ich stan dynamiczny. Przy okazji nowe wymagania „pogarszają” stan techniczny starych maszyn. Służby techniczne stosują bowiem zaostżone nowe normy do maszyn, które wytworzono, gdy poziom technologii był niższy, a obowiązujące wówczas wymagania były łagodniejsze [266].

**7.2. Kryteria oceny stanu drganiowego maszyn, wartości graniczne pracy maszyn**

Najprostszą i najstarszą metodą diagnozowania maszyn wirujących są okresowe lub ciągłe pomiary szerokopasmowych poziomów drgań, które są oparte na śledzeniu trendu zmian poziomu prędkości (głównie Europa) lub przyspieszenia drgań (głównie Ameryka, rzadziej Europa) w szerokim paśmie częstotliwości, obejmującym zakres widma częstotliwościowego maszyny. Zakres częstotliwości zależy od rodzaju maszyny [190, 191]. Zakres niezbędny do oceny maszyny z łożyskami tocznymi powinien zawierać częstotliwości wyższe niż w przypadku maszyny z łożyskami ślizgowymi. Dla silników WN (wysokiego napięcia) częstotliwości żłobkowe znajdują się powyżej 1 kHz. Oznacza to, że zakres pomiarowy powinien obejmować co najmniej pasmo 10 Hz – 2,0 kHz [190, 191]. Dla maszyn wolnoobrotowych zalecana jest dolna granica częstotliwości na poziomie 2 Hz. Należy zwrócić uwagę na istotną różnicę w stosunku do poprzednich wymagań normowych. W przeszłości intensywność drgań wyznaczała wartość skuteczną prędkości drgań mierzoną w paśmie 10 Hz – 1 kHz.

Wielkości otrzymane z pomiarów w szerokim paśmie częstotliwości, obejmującym zakres widma częstotliwościowego maszyny, są porównywane z dopuszczalnymi granicznymi poziomami wibracji określonymi w normach ISO 10816 oraz ISO 7919 (pomiary drgań względnych wałów) i na tej podstawie maszyna jest oceniana, a następnie jest podejmowana decyzja o dalszej eksploatacji lub zatrzymaniu danej maszyny. Według normy ISO 10816 w celu oceny stanu technicznego maszyny należy wykonać pomiary wartości skutecznej prędkości drgań w ustalonym zakresie częstotliwości ( $V_{RMS}$ ) w punktach przedstawionych na rys. 8 i 9 oraz porównać wyniki ze wskazaniem

**Rys. 9.** Punkty pomiarowe na pionowym zespole maszynowym wg norm [190, 191]

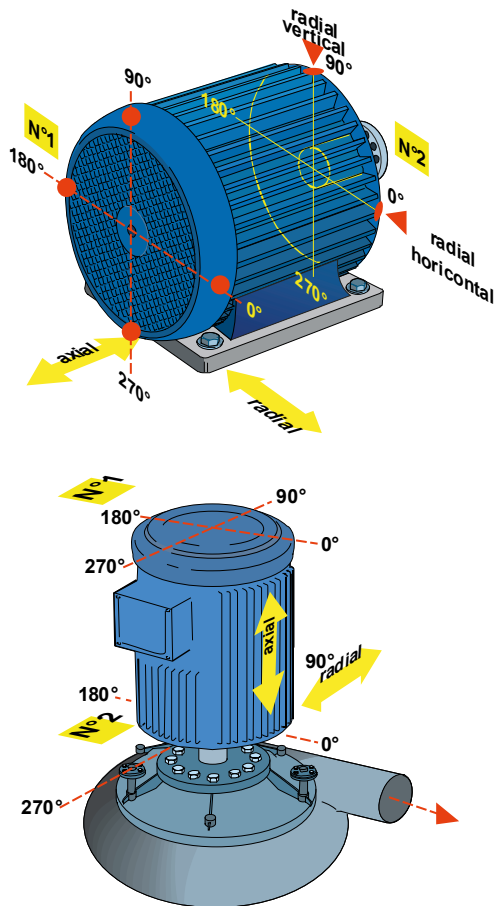


norm. Natężenie drgań maszyny to największa ze zmierzonych wartości  $V_{RMS}$  w punktach pomiarowych.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \tag{10}$$

gdzie:  $V_{RMS}$  – wartość skuteczna prędkości drgań w określonym przedziale częstotliwości;  $T$  – przedział czasu, dla którego określa się  $V_{RMS}$ , czas całkowania;  $v(t)$  – prędkość drgań, sygnał prędkości drgań.

Bezwzględne wartości  $V_{RMS}$  podane przez normy nie zawsze są trafne, zważywszy na indywidualne cechy poszczególnych maszyn oraz impedancję mechaniczną w punkcie pomiaru, niemniej są one ogólnie użyteczne. Wskazują bowiem na znaczenie wzrostu poziomu drgań w różnym stopniu dla różnych maszyn. Norma ISO 10816 (rys. 12) stwierdza, iż 2,5-krotny wzrost wartości  $V_{RMS}$  (o 8 dB) jest zmianą istotną, ponieważ pokrywa jedną klasę jakości. Wzrost 10-krotny (o 20 dB) lub większy jest poważny, ponieważ może zmienić klasyfikację maszyny – „dobry stan techniczny” na „nie dopuszczalny stan techniczny”.



Rys. 10. Punkty pomiarowe i kierunki pomiarów drgań dla przykładowego silnika poziomego i pionowego [190, 191, 192]

W praktyce diagnostycznej wykonuje się pomiary drgań na obudowie łożysk lub na tarczach łożyskowych w obszarze największej sztywności albo na korpusie maszyny w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału w kierunku poziomym i pionowym oraz wzdłuż osi wału na wysokości osi, możliwie jak najbliżej wału. Ilustrują to rys. 10 i 11.

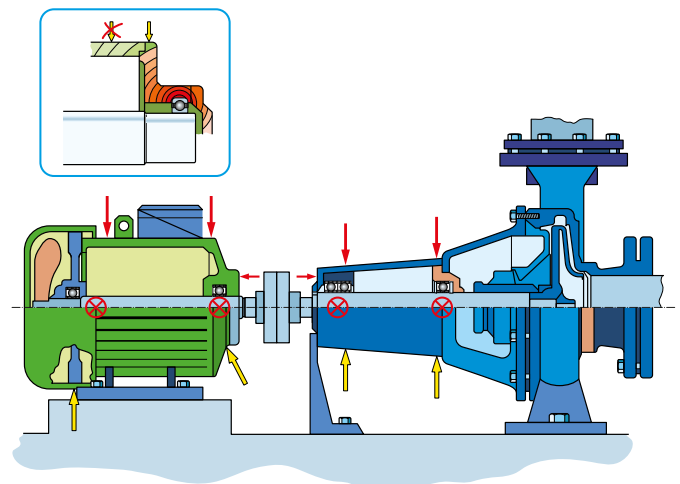
Oceniając stan drganiowy maszyn, utożsamiany z ich stanem dynamicznym, w praktyce przyjmuje się najczęściej podział na cztery strefy dynamiczne:

**A – stan dobry** (na rys. 12 kolor niebieski) – poziom drgań nowo oddanych do eksploatacji maszyn powinien zawierać się w tym zakresie;

**B – stan użyteczny** (na rys. 12 kolor zielony) – maszyny, których poziom drgań zakwalifikowano do tej strefy, mogą pracować długotrwale bez ograniczeń;

**C – stan warunkowo dopuszczalny** (na rys. 12 kolor żółty) – maszyny, których poziom drgań zawiera się w tej strefie, uważa się zwykle za nienadające się do długotrwałej pracy ciągłej; na ogół maszyna może pracować przez ograniczony czas, aż będzie możliwość podjęcia działań zapobiegawczych, remontowych;

**D – stan niedopuszczalny** (na rys. 12 kolor czerwony) – wartości poziomu drgań w tej strefie są uważane za zbyt duże i wskazują na możliwość wystąpienia uszkodzenia maszyny; po osiągnięciu takiego poziomu drgań maszynę należy wyłączyć.



Rys. 11. Punkty pomiarowe i kierunki pomiarów drgań dla przykładowego agregatu pompowego [190, 191, 192]

								Przykładowe drgania	
								10 – 1000 Hz, n = 600 /min	
								1 – 1000 Hz, n = 600 /min	
								mm/s rms	
								inchs rms	
								Fundament	
								Typ maszyny	
								Grupa	
								11	0,44
								7,1	0,28
								4,5	0,18
								3,5	0,11
								2,8	0,07
								2,3	0,04
								1,4	0,03
								0,71	0,02
sztwywny	podatny	sztwywny	podatny	sztwywny	podatny	sztwywny	podatny	mm/s rms	inchs rms
pompy > 15 kW				średnie maszyny					
promieniowe, osiowe				15 kW < P ≤ 300 kW					
napęd zewnętrzny				duże maszyny					
napęd bezpośredni				silniki					
Grupa 4				160 mm ≤ H < 315 mm					
Grupa 3				300 kW < P ≤ 50 MW					
				silniki					
				315 mm ≤ H					
				Grupa 1					
								<b>A</b> stan idealny <b>B</b> dopuszczenie do ruchu bez ograniczeń <b>C</b> dopuszczenie do ruchu z ograniczeniami <b>D</b> zagrożenie awarią	

Rys. 12. Graniczne dopuszczalne poziomy wibracji wg normy PN-EN-ISO 10816 [192]

### 7.3. Podział maszyn na grupy dynamiczne

Ze względu na grupy dynamiczne maszyn w praktyce przyjmuje się najczęściej podział przeprowadzony stosownie do typu maszyny, jej mocy znamionowej lub wzniosu osi wału, zgodnie z normą ISO 10816:

**Grupa 1:** Wielkie maszyny o mocy znamionowej ponad 300 kW; maszyny elektryczne o wzniosie osi wału  $H \geq 315$  mm (maszyny te mają zazwyczaj łożyska ślizgowe, zakres prędkości obrotowych rozciąga się od 120 obr./min do 15 000 obr./min).

**Grupa 2:** Maszyny o średniej mocy znamionowej – powyżej 15 kW aż do 300 kW włącznie; maszyny elektryczne o wzniosie osi wału  $160 \text{ mm} \leq H \leq 315 \text{ mm}$  (maszyny te mają zazwyczaj łożyska toczne i prędkości obrotowe powyżej 600 obr./min).

**Grupa 3:** Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z oddzielnym napędem (odśrodkowe, o mieszanym przepływie lub o przepływie osiowym), o mocy znamionowej powyżej 15 kW (maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).

**Grupa 4:** Pompy z wirnikami wielołopatkowymi i z wbudowanym napędem (odśrodkowe, o mieszanym przepływie i o przepływie poosiowym) o mocy znamionowej powyżej 15 kW

**Tabela 1.** Klasyfikacja stref dla poszczególnych grup maszyn – drgania bezwzględne [192]

Grupa	Posadowienie	Granice strefy	Prędkość drgań, wartość skuteczna $V_{RMS}$ [mm/s]
1	Szttywne	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
	Sprężyste	A/B	3,5
		B/C	7,1
		C/D	11
2	Szttywne	A/B	1,4
		B/C	2,8
		C/D	4,5
	Sprężyste	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
3	Szttywne	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1
	Sprężyste	A/B	3,5
		B/C	7,1
		C/D	11
4	Szttywne	A/B	1,4
		B/C	2,8
		C/D	4,5
	Sprężyste	A/B	2,3
		B/C	4,5
		C/D	7,1

**Tabela 2.** Klasyfikacja stref dla maszyn o mocy znamionowej poniżej 15 kW – drgania bezwzględne [192]

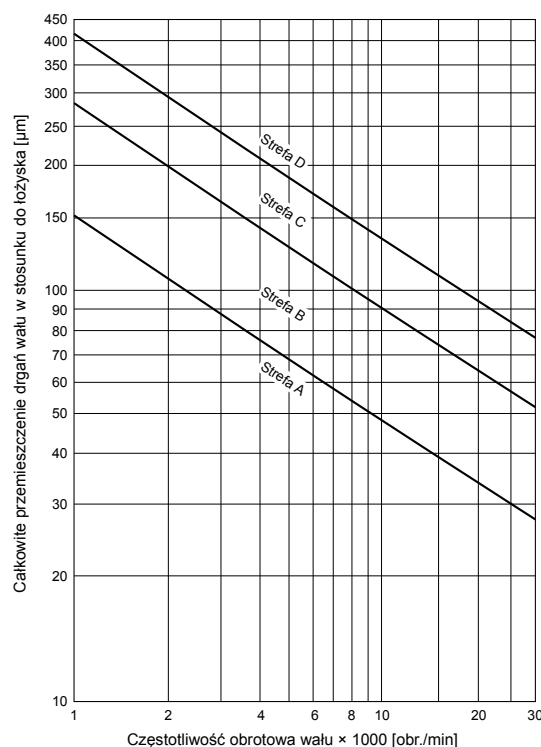
Granice strefy	Prędkość drgań, wartość skuteczna $V_{RMS}$ [mm/s]
A/B	0,71
B/C	1,80
C/D	4,50

(maszyny tej grupy mogą mieć łożyska ślizgowe lub łożyska toczne).

Dodatkowo, do czasu ukazania się stosownej części ISO 10816, wyróżniano grupę maszyn o mocy znamionowej poniżej 15 kW.

Wymagania drganiowe wobec maszyn przedstawiono w tabelach 1 i 2 oraz na rys. 12 i 13.

Asortyment maszyn w cementowniach jest bardzo zróżnicowany zarówno pod względem konstrukcji i wielkości, jak i pod względem parametrów kinematycznych. O ile różnorodność konstrukcji i wielkość maszyn nie stwarzają poważniejszych przeszkód w ocenie stanu technicznego maszyn metodami wibroakustycznymi, o tyle w przypadku maszyn wolnoobrotowych występują problemy techniczne. Problemy te występują zarówno przy określaniu związku symptomów drganiowych z rodzajem i miejscem występowania usterki, jak i od strony pomiarowej. Pomiar drgań niskich częstotliwości są stosunkowo trudne do wykonania. Choć dolna granica pomiaru sejsmicznych przetworników drgań (akcelerometrów) będących na wyposażeniu służb diagnostycznych cementowni wynosi najczęściej 0,2 Hz, to przyrządy pomiarowe zazwyczaj nie umożliwiają dokonania wiarygodnych pomiarów przy tak niskich częstotliwościach (ograniczenia w czasach całkowania). Te ograniczenia nie wykluczają jednak możliwości wdrożenia diagnostyki eksploatacyjnej, gdyż składowe niskoczęstotliwościowe rzadko są wykorzystywane jako symptomy diagnostyczne.



**Rys. 13.** Klasyfikacja stref dla poszczególnych maszyn – drgania względne [192]

Drgania o niskich częstotliwościach są bardzo słabo tłumione przez konstrukcje i przenoszone są na znaczne odległości. Z tych względów należy się liczyć z obecnością w sygnale drganiowym zakłóceń przypadkowych pochodzących z oddalonych źródeł – drgania własne budynków, hal, konstrukcji. Pomiar w niskim zakresie częstotliwości wymagają bardzo długich czasów uśrednień. Wystąpienie tego rodzaju drgań najczęściej nie powoduje gwałtownych uszkodzeń maszyn.

### Przypisy

- 1 Z ang. QR Code, czyli *Quick Response Code*, to modułowy kod stałowymiarowy (o postaci kwadratu wypełnionego ciemnymi i jasnymi polami), umożliwiający zapisanie dużej ilości danych.
- 2 System cyberfizyczny to połączenie komponentów informacyjnych oraz programistycznych z częściami mechanicznymi i elektrycznymi, które komunikują się za pośrednictwem infrastruktury danych, takiej jak np. Internet. Cechą charakterystyczną systemu cyberfizycznego jest wysoki stopień złożoności. Tworzenie systemów cyberfizycznych odbywa się poprzez łączenie w sieci zintegrowanych systemów na drodze komunikacji przewodowej bądź bezprzewodowej (Wikipedia, dostęp: 02.06.2020 r.).

Bibliografia dostępna pod linkiem: [nis.com.pl/bibliografia.html](http://nis.com.pl/bibliografia.html)

Fragment pochodzi z książki:

*Utrzymanie ruchu w przemyśle,*

Sławomir Szymaniec, Marek Kacperak

Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021