Predictive Maintenance:
podejście umożliwiające optymalną eksploatację obiektów technicznych

Platforma Przemysłu Przyszłości

MARIUSZ HETMAŃCZYK

Kierownik Zespołu Doradztwa i Wsparcia Narzędziowego
Fundacja Platforma Przemysłu Przyszłości

Monitoring, diagnostyka oraz predykcja stanu eksploatacyjnego są filarami różnych strategii utrzymania ruchu maszyn i procesów produkcyjnych. W wielu wypadkach istnieje wiele nieporozumień odnoszących się do zrozumienia ich znaczenia oraz wymagań technicznych i organizacyjnych.

Wymienione działania nie powinny być kojarzone jako zastępujące się techniki O&M (ang. *Operations and Maintenance*), a raczej jako składowe wzajemnie uzupełniających się działań budujących spójne strategie utrzymania ruchu.

Niniejsze opracowanie ma jedynie charakter informacyjny i nie może stanowić podstawy do jakichkolwiek roszczeń związanych z decyzjami gospodarczymi podejmowanymi w związku z powyższymi treściami. Autor ani Fundacja Platforma Przemysłu Przyszłości nie ponosi odpowiedzialności za konsekwencje decyzji biznesowych podejmowanych przez podmioty korzystające z opracowania, a wszelkie ryzyko związane z takimi decyzjami ponosi podmiot je podejmujący.

Monitoring, diagnostyka oraz predykcja stanu eksploatacyjnego są filarami różnych strategii utrzymania ruchu maszyn i procesów produkcyjnych. W wielu wypadkach istnieje wiele nieporozumień odnoszących się do zrozumienia ich znaczenia oraz wymagań technicznych i organizacyjnych. Wymienione działania nie powinny być kojarzone jako zastępujące się techniki O&M (ang. *Operations and Maintenance*), a raczej jako składowe wzajemnie uzupełniających się działań budujących spójne strategie utrzymania ruchu.

Ważnym czynnikiem jest zrozumienie kolejności wdrożenia poszczególnych metod oraz ich wymagań (w zakresie sprzętu i oprogramowania) niezbędnych do opracowania niezawodnego i wydajnego systemu. Monitorowanie jest elementem niezbędnym do wdrożenia wszystkich metod diagnostyki technicznej, natomiast diagnoza wymaga wdrożenia dodatkowego czynnika w postaci specjalistycznej wiedzy.

Programy eksploatacji i utrzymania ruchu maszyn

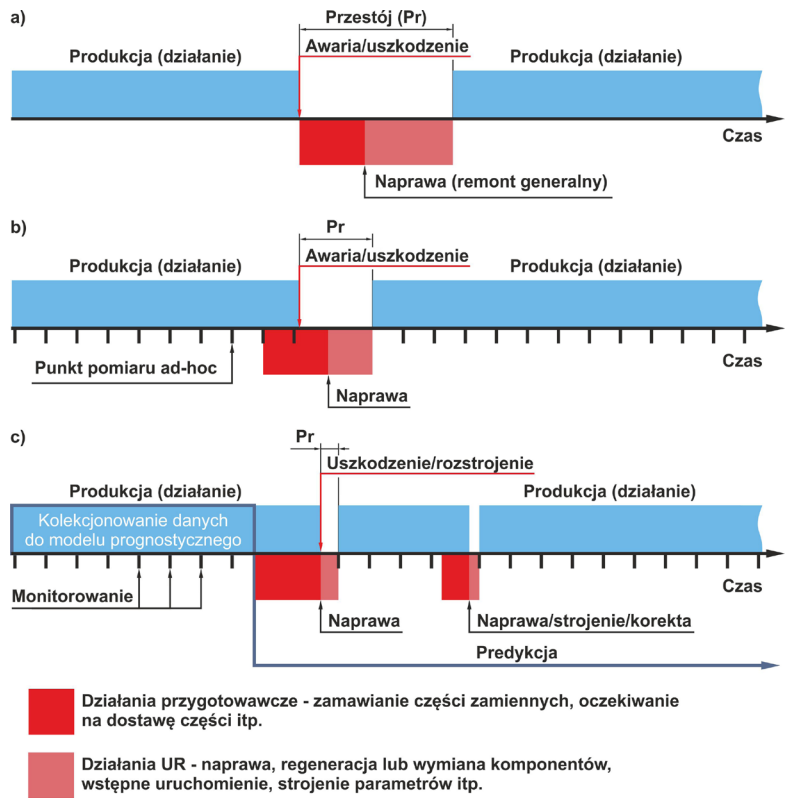
Programy eksploatacji i utrzymania ruchu maszyn zostały podzielone na trzy grupy (w zależności od przyjętej metody kontroli parametrów):

- **bez nadzoru** – brak estymacji stanu eksploatacyjnego obiektu,
- **z nadzorem diagnostycznym** – pomiary parametrów wykonywane okresowo do celów identyfikacji bieżącego stanu eksploatacyjnego,
- **ze zintegrowanym nadzorem i predykcją** – pomiary parametrów wykonywane okresowo do celów identyfikacji bieżącego stanu eksploatacyjnego oraz estymacji czasu do wystąpienia awarii.

Do głównych problemów występujących w fazie implementacji różnych programów eksploatacji, technik diagnostycznych, a także sformalizowanych metod identyfikacji awarii należą m.in.:

- zmienność produkcji (pociągająca za sobą zmiany wartości parametrów, modyfikacje urządzeń, przezbrojenia technologiczne itp.),
- konieczność zachowania przyjętych wskaźników niezawodności i trafności wnioskowania (przy osiągnięciu minimalnej wartości czasu tej operacji),
- niski poziom wiedzy i świadomości technicznej (przemawiający na korzyść zastosowania metod wspomaganych komputerowo),
- ograniczenia zasobów sprzętu diagnostycznego, wynikające z potrzeby redukcji kosztów.

W pierwszej odmianie eksploatacji (rys. 1a) zakłada się całkowity brak nadzoru parametrów procesowych maszyn i urządzeń. W drugiej (rys. 1b) ciągłe lub okresowe monitorowanie stanu z jednoczesną diagnozą. Podejście trzecie (rys. 1c) zawiera zaawansowane metody estymacji stanów, z możliwością określenia



Rys. 1. Wzorce aktywności w fazach cykli pracy, w przypadku eksploatacji maszyn: a) bez nadzoru diagnostycznego, b) z nadzorem diagnostycznym, c) z nadzorem diagnostycznym i predykcją stanów (opracowanie własne: Mariusz Hetmańczyk)

przybliżonego czasu do wystąpienia awarii. W tym przypadku wymagane jest monitorowanie maszyn (w celu kolekcjonowania danych) i zbudowanie historii eksploatacji obiektu w przeszłości.

Na rysunku 1 przedstawiono działania związane z:

- przygotowaniem do czynności naprawczych, strojenia lub korekty parametrów maszyny,
- operacjami wykonywanymi bezpośrednio przez Służby Utrzymania Ruchu (SUR).

Należy pamiętać, że w większości zakładów przemysłowych obsługa maszyn i urządzeń wewnątrz przedsiębiorstwa realizowana jest zgodnie z założeniami systemów TPM (ang. *Total Productive Maintenance*) lub WCM (ang. *World Class Manufacturing*). Takie rozwiązania integrują wiele działań, w tym:

- udział operatorów maszyn realizujących Autonomiczne Utrzymanie Ruchu (ang. *Autonomous Maintenance*) – czyszczenie, smarowanie, dokręcenie elementów złącznych, uzupełnienie części, uzupełnienie oprzyrządowania, przestrzeganie kolejności operacji, ciągłe doskonalenie,
- przesunięcie SUR do planowanej konserwacji oraz bieżących napraw.

TPM oraz WCM zakładają zmniejszenie pilnych i niezaplanowanych działań z zakresu utrzymania ruchu do niezbędnego minimum. W przypadku konieczności wykonania czynności wykraczających poza umiejętności operatorów maszyn, działania prowadzone są przez wykwalifikowanych pracowników SUR.

W związku z tym, w działaniach przygotowawczych (rys. 1a, b) należy uwzględnić błędy w organizacji pracy, komunikacji oraz logistyce (tj. czasy: zgłoszenia awarii, odnalezienie personelu technicznego do naprawy, sprawdzenie rodzaju awarii oraz identyfikację jej miejsca, znalezienie narzędzi lub oprzyrządowania, zamówienie oraz dostarczenie części zamiennych).

Czas trwania czynności przygotowawczych wpływa na przestoje produkcyjne i może być czynnikiem obniżającym sprawność SUR, zwłaszcza w przypadku eksploatacji i utrzymania ruchu maszyn bez nadzoru.

W tabelach 1–4 zestawiono charakterystyczne cechy przemysłowych programów eksploatacji i utrzymania ruchu maszyn.

Metoda korekcyjna (tab. 1) wyklucza zastosowanie monitorowania parametrów pracy maszyn. Podobna sytuacja występuje w metodzie prewencyjnej (tab. 2), jednak coraz częstszym podejściem jest stosowanie monitorowania lub różnych metod diagnostycznych do wspomagania planowania resursów remontowych.

Opisane rozwiązania (tab. 1, 2) stanowią podstawę do definicji zakresu czynności złożonych programów eksploatacji i utrzymania ruchu maszyn. Ze względu na ich cechy, są rzadko stosowane w podstawowych formach, jednakże wykazują komplementarność z nowoczesnymi metodami w ramach wybranych typów maszyn oraz wydziałów produkcyjnych.

Tab. 1. Charakterystyka programu korekcyjnego (reaktywnego) utrzymania ruchu maszyn i urządzeń

CECHY	CHARAKTERYSTYKA
Podstawowe założenia	• maszyna jest używana aż do osiągnięcia stanu awarii, • stosowana do mało znaczących systemów lub w przypadku jednostek redundantnych.
Zalety	• brak wzrostu wskaźnika awaryjności maszyn, urządzeń i procesów, • nie są wymagane wyspecjalizowane urządzenia diagnostyczne, • niższe koszty utrzymania niż w przypadku realizacji innych programów konserwacji maszyn, • komplementarność z innymi programami w zakresie maszyn i urządzeń ogólnego przeznaczenia.
Wady	• duże ryzyko wystąpienia poważnej awarii (niebezpieczeństwo zagrożenia życia lub zdrowia pracowników lub zakłóceń procesu produkcji), co skutkuje wysokimi kosztami (naprawy, wymiany elementów), • awarie lub zniszczenia o dużej skali (występują uszkodzenia wtórne sprzężonych części lub maszyn), • niemożliwość planowania przebiegu produkcji (ryzyko uszkodzenia na skutek przypadkowego przeciążenia lub błędów operacyjnych), • długie okresy między przeglądami implikujące wysokie koszty przestojów oraz opóźnienia produkcyjne (w przypadku awarii), • konieczność utrzymywania dużych zapasów części zamiennych lub szybkich dostaw części zamiennych, • problemy z zarządzaniem personelem, • możliwe duże straty (produkowane wyroby i materiały).
Zastosowanie	• nowe wyposażenie, • małe zakłady pracy, • najczęstszy sposób interpretacji stanu maszyn i urządzeń.

Tab. 2. Charakterystyka programu planowanego (prewencyjnego) utrzymania ruchu maszyn i urządzeń

CECHY	CHARAKTERYSTYKA
Podstawowe założenia	• wiąże się z wyznaczeniem czasu pracy (zależnego od warunków), po którym urządzenie (niezależnie od jego stanu technicznego) jest poddane kontroli, naprawie lub wymianie komponentów, • przeznaczone do produkcji o powtarzalnym charakterze (po wykonaniu partii elementów realizowane są przeglądy okresowe).
Zalety	• stały okres między remontami, możliwość planowania produkcji (oszczędność energii i nakładu pracy), • niższe koszty z tytułu planowanego zakresu remontów, • możliwość planowania działań i czynności pracowników, • nie są wymagane wyspecjalizowane urządzenia diagnostyczne, • obniżenie kosztów (w stosunku do metody korekcyjnej), • komplementarność z innymi programami w zakresie maszyn i urządzeń ogólnego przeznaczenia.
Wady	• uszkodzenie maszyny może wystąpić pomiędzy kolejnymi okresami remontowymi (niespodziewana awaria, zwiększone koszty naprawy lub straty produkcyjne), • naprawie lub przeglądowi mogą być poddane maszyny, które są w dobrym stanie operacyjnym (wzrost ogólnych kosztów), • możliwość uszkodzenia (podczas demontażu) maszyn lub komponentów, • zwiększenie wskaźnika awaryjności środków technicznych, • remonty i przeglądy oparte na wiedzy lub dokumentacji producenta, zdolnościach manualnych i doświadczeniu pracowników.
Zastosowanie	• park maszynowy składający się z urządzeń o wysokiej niezawodności i ze znormalizowanych elementów, • urządzenia wymagające okresowej wymiany elementów funkcjonalnych (pneumatyka, hydraulika, urządzenia elektryczne i przemysłowe systemy napędów elektrycznych), • urządzenia techniczne wymagające realizacji okresowych kontroli ze względu na wymogi bezpieczeństwa (dźwigi, windy, podnośniki itp.), • produkcja w partiach lub trybie sezonowym.

Ciągłe lub okresowe monitorowanie stanu eksploatacyjnego oraz diagnoza są zawarte w założeniach metod konserwacji zależnej od stanu maszyny, np. PdM/PTI (ang. *Predictive Maintenance/Predictive Testing and Inspection*, tab. 3) oraz w podejściu proaktywnym RCM (ang. *Reliability Centered Maintenance*, tab. 4).

Podstawowym założeniem predykcyjnego utrzymania ruchu PdM jest podjęcie czynności prewencyjnych w fazie pogorszenia parametrów eksploatacyjnych maszyn lub procesów, w celu zapobiegania groźnych w skutkach awarii i związanych z nimi przestojami.

Do narzędzi PdM należą m.in. monitorowanie parametrów wydajności, nieinwazyjne techniki testowania oraz kontrola wzrokowa. W zakresie dostępnych metod możliwe jest zastosowanie rozpoznawania wzorców, analizy trendów oraz korelacji, statystycznej analizy danych, monitorowania progów alarmowych oraz wielu innych metod do obróbki sygnałów.

Monitorowaniu może podlegać wiele parametrów maszyn, jednak dedykowane temu zadaniu sensory zostały podzielone na dwie grupy w postaci czujników procesowych (służących przede wszystkim celom wykonania zadań produkcyjnych pod względem założonego algorytmu sterowania) oraz systemów monitorowania warunków pracy (monitorowanie i diagnostyka drgań; przepływomierze do sprężonego powietrza, wody oraz innych mediów technologicznych lub eksploatacyjnych; kontrola jakości oleju; systemy przetwarzania sygnałów; sygnalizacja i wyświetlanie parametrów eksploatacyjnych).

Tab. 3. Charakterystyka programu predykcyjnego (opierającego się na stanie) utrzymania ruchu maszyn i urządzeń

CECHY	CHARAKTERYSTYKA
Podstawowe założenia	• ocena stanu na podstawie pomiaru i przetwarzania sygnałów definiujących bieżący stan, • głównym czynnikiem w podejmowaniu decyzji co do naprawy lub wymiany części jest pogorszenie parametrów pracy (nie liczba godzin pracy), zdefiniowane jako przekroczenie dopuszczalnych limitów przyjętych do oceny stanu.
Zalety	• przedłużenie żywotności maszyny (zmniejszenie liczby planowanych remontów i udziału kosztownych uszkodzeń wtórnych oraz poważnych wypadków), • redukcja kosztów operacyjnych (identyfikacja wadliwych podzespołów we wstępnej fazie rozwoju uszkodzenia), • skrócenie czasu i kosztów napraw, • poprawa bezpieczeństwa w miejscu pracy, • oszczędność energii, • eliminacja katastrofalnych awarii, • zwiększenie wskaźnika jakości produktu, • identyfikacja słabych punktów maszyn i urządzeń.
Wady	• potrzeba ciągłego szkolenia pracowników (operatorów, diagnostów i pracowników administracyjnych), • konieczność przeprowadzenia kompleksowej analizy systemu (punkty pomiarowe, opracowanie procedur diagnostycznych, identyfikacja symptomów, przegląd norm) w celu określenia dopuszczalnych progów monitorowanych wartości, • konieczność zakupu aparatury kontrolno-pomiarowej, • potrzeba opracowania procedur rozwiązywania problemów w czasie przestojów i napraw.
Zastosowanie	• linie produkcyjne i komórki produkcyjne (postój jednej maszyny zakłóca działania całego procesu produkcyjnego), • maszyny i urządzenia krytyczne oraz ogólnego przeznaczenia, • procesy o wysokich wymaganiach jakościowych.

Podejście proaktywne RCM jest koncepcją planowania konserwacji zapewniającej bezawaryjne działanie systemów technicznych w ich obecnym kontekście zastosowania. RCM zakłada współpracę użytkownika obiektu technicznego z producentem, w celu ciągłego doskonalenia konstrukcji skutkującego wzrostem niezawodności działania. W ramach programu RCM powinny zostać wdrożone następujące działania:

- wykonywanie zadań związanych z konserwacją i inspekcją, które są zgodne z celami biznesowymi,
- osiągnięcie zgodności z obowiązującymi przepisami oraz przyjęcie faktycznej odpowiedzialności za bezpieczeństwo i wpływ na środowisko,
- określenie prawdziwych celów wydajnościowych każdego zakładu, jednostki, procesu, systemu i elementu wyposażenia w zakresie realizacji zdefiniowanych zadań,
- identyfikacja zagrożeń związanych z osiąganiem celów wydajnościowych,
- określanie ryzyka związanego z zagrożeniami (w obszarze sprzętu, procesów, ludzi, środowiska itp.),
- określenie najbardziej wydajnych i skutecznych sposobów ograniczania niedopuszczalnego poziomu ryzyka,
- sprawdzanie poprawności, wdrażanie i wykonywanie zadań łagodzących skutki awarii,
- dokumentowanie całego procesu w sposób ułatwiający ciągłą ocenę wydajności i ciągłe doskonalenie procesu przez cały cykl życia zasobów produkcyjnych.

Tab. 4. Charakterystyka programu RCM (proaktywnego) utrzymania ruchu maszyn i urządzeń

CECHY	CHARAKTERYSTYKA
Podstawowe założenia	• zapewnia kompleksowe podejście do problemu eksploatacji, • kombinacja wszystkich programów serwisowych, • obejmuje śledzenie awarii w celu zidentyfikowania źródła, a następnie eliminacji efektów i źródeł (strojenie, a także przeprojektowanie), • wymaga ścisłej współpracy wielu działów technicznych (m.in. pomiędzy wykonawcami i użytkownikami końcowymi), • dopuszczalne zmiany konstrukcji lub konfiguracji diagnozowanych obiektów (w celu zwiększenia wydajności, zwiększenia czasu pracy bez awarii i eliminacji źródeł częstych awarii).
Zalety	• umożliwia ciągłe doskonalenie konstrukcji maszyn i urządzeń, • integracja zaawansowanych systemów kontroli produkcji i narzędzi poprawy jakości (zmiany na poziomie produkcji i zarządzania), • usprawnienie przebiegu procesów przemysłowych, • połączenie wiedzy operatorów maszyn i diagnostów (podział obowiązków wynikających z lepszego zarządzania pracownikami), • szeroki asortyment używanego wyposażenia oraz oprogramowania (wyspecjalizowane jednostki i systemy kombinowane budowane na podstawie integracji tradycyjnych systemów kontroli, systemów SCADA i zarządzania danymi procesowymi).
Wady	• potrzeba ciągłego szkolenia pracowników (operatorów, diagnostów i pracowników administracyjnych), • generowanie wysokich kosztów oraz konieczności opracowania specjalnych procedur (w odniesieniu do napraw i czynności konserwacyjnych, identyfikacji ścieżki pomiarowej, słabych punktów, a także analizy RCA), • koncepcja wciąż w fazie rozwoju (z niskim udziałem wdrożeń).
Zastosowanie	• zakłady produkcyjne o ściśle zdefiniowanym profilu produkcyjnym, • wysoki poziom automatyzacji produkcji, • zakup specjalistycznych maszyn od stałych dostawców (przy uwzględnieniu konieczności przeprojektowania, rekonfiguracji, modyfikacji algorytmu działania na wyraźne żądanie odbiorcy).

Kompleksowe wdrożenie wszystkich założeń zawartych w metodach predykcyjnego utrzymania ruchu wymaga zrozumienia narzędzi oraz ograniczeń, które charakteryzują dostępne metody eksploatacji maszyn.

Do zalet wdrożenia metody PdM należą:

- zmniejszenie kosztów awarii oraz minimalizacja sumarycznego czasu przestoju,
- redukcja zapasów części zamiennych oraz całkowitego kosztu utrzymania parku maszynowego,
- możliwość obserwacji bieżących parametrów pracy oraz stanów eksploatacyjnych maszyn, a także analizę ich stanu,
- poprawa bezpieczeństwa pracy oraz zwiększenie jakości produkcji,
- brak konieczności używania skomplikowanych statystycznych modeli niezawodności maszyn, na korzyść zastosowania znanych metod diagnozy (opartych na normatywach) lub relacjach pomiędzy sygnałami diagnostycznymi,
- zmniejszenie wpływu oraz eliminacja uszkodzeń wtórnych (tj. uszkodzeń wynikających ze szkodliwego wpływu drgań, podwyższonych temperatur, powiększenia luzów uszkodzonych elementów), co wpływa bezpośrednio na wydłużenie czasu życia maszyny,
- zmniejszenie czasu potrzebnego na naprawę (zarejestrowanie spadku jakości parametrów pracy poniżej dopuszczalnego progu, z jednoczesną lokalizacją uszkodzenia, pozwala na zamówienie części oraz przygotowanie narzędzi do wykonania naprawy),
- opracowanie procedur lub działań zapobiegających dalszemu pogarszaniu stanu (w tym automatycznych urządzeń zabezpieczających),
- poprawę wskaźników (jakości, wydajności, zadowolenia pracowników, bezpieczeństwa pracy).

Jako wyznacznikiem poprawnego wdrożenia predykcyjnego utrzymania ruchu można posłużyć się ogólnie przyjętymi wskaźnikami, w postaci:

- OEE (ang. *Overall Equipment Efectiveness*) – implementacja PdM powinna spowodować wyraźny wzrost wartości wskaźnika,
- MTBF (ang. *Mean Time Between Failure*) – zwiększenie wartości wskaźnika, przy jednoczesnym zmniejszeniu wskaźnika MTTR (ang. *Mean Time To Repair*).

W przypadku wskaźnika OEE, przy zastosowaniu technik PdM, możliwe jest ograniczenie strat dostępności (awarii, regulacji oraz strojenia), użytkowania (czasy zatrzymania) oraz jakości (uzyskanie braków, złomu, konieczności poprawek). Pozostałe składowe strat (przezbrojenia, czasu pracy jałowej, rozruchu oraz wygaszania maszyn) zawierają się raczej w domenie metod zarządzania oraz przyjętej technologii produkcji.

Identyfikacja potrzeb przy wyborze programu eksploatacji i utrzymania ruchu maszyn zależy od decyzji służb utrzymania ruchu, inżynierów diagnostów oraz kadry menadżerskiej. Wybór pociąga za sobą konieczność zdefiniowania reguł rządzących estymacją bieżących lub przyszłych stanów maszyn i urządzeń.

Zdefiniowanie oraz przyporządkowanie zasobów sprzętowych i technik diagnostycznych, używanych w ramach danego programu eksploatacji, jest wykonywane zazwyczaj na podstawie klasyfikacji maszyn do trzech rozłącznych grup (krytycznych, istotnych i ogólnego przeznaczenia). Podział na poszczególne grupy może być zrealizowany pod względem różnych kryteriów (Rys. 2 na nast. stronie).

Klasyfikacja wyposażenia i maszyn przemysłowych

Wyposażenie i maszyny krytyczne
(awaria wpływa na stan bezpieczeństwa zakładu przemysłowego)

Kryteria klasyfikacji:
- maszyny istotne w prawidłowym przebiegu procesu produkcyjnego (awaria powoduje znaczną redukcję wydajności, spadek jakości, zachwianie wskaźników oceny produkcji i maszyn np. OEE, MTBF, MTTR),
- jednostki napędowe, których nie można zdublować (wysoka cena) lub o dużej mocy użytkowej,
- maszyny o dużym koszcie zakupu, utrzymania oraz długim czasie remontu lub naprawy,
- maszyny, których uszkodzenie następuje w wyniku nieznacznych zakłóceń przebiegu pracy,
- maszyny umożliwiające poprawę wydajności lub zwiększenie jakości produkcji.

Wyposażenie i maszyny istotne
(awaria może spowodować zaburzenie poziomu bezpieczeństwa zakładu oraz znaczną redukcję wydajności wydziału lub części procesu produkcyjnego)

Kryteria klasyfikacji:
- maszyny w przypadku których mogą występować (lub nie) jednostki redundantne,
- możliwość rozruchu (po naprawie), która może wpływać na parametry procesu produkcyjnego,
- jednostki napędowe o dużej mocy oraz liczbie obrotów (pracujące w cyklu przerywanym),
- maszyny, w których stosuje się model eksploatacji oparty na czasie,
- maszyny o średnim koszcie oraz czasie naprawy,
- maszyny, których uszkodzenie następuje w wyniku postępującego czasu (brak nagłych awarii).

Wyposażenie i maszyny ogólnego zastosowania
(awaria nie wpływa na bezpieczeństwo zakładu przemysłowego)

Kryteria klasyfikacji:
- urządzenia lub maszyny niezaklasyfikowane do zbioru krytycznych oraz istotnych,
- maszyny zdublowane lub pracujące na wyraźne żądanie (pracujące w cyklach doraźnych),
- maszyny o niskim koszcie oraz krótkim czasie naprawy (ryzyko wystąpienia kolejnej awarii po naprawie określone jako minimalne).

Rys. 2. Podział maszyn, wyposażenia, urządzeń oraz kryteria przyjęte w fazie wyboru programu eksploatacji i utrzymania ruchu maszyn i urządzeń (opracowanie własne: Mariusz Hetmańczyk)

W odniesieniu do określonych wymagań klasyfikacyjnych i wyróżnionych grup (Rys. 2) stawia się dodatkowe zalecenia odnośnie do maszyn:

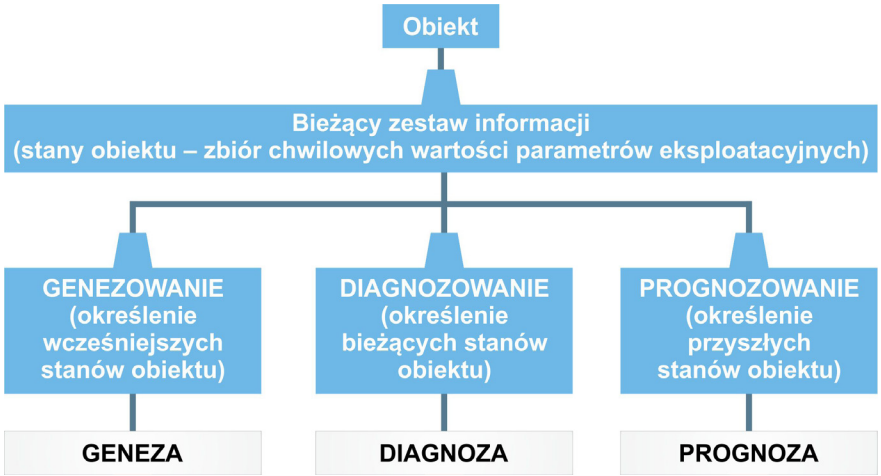
- **krytycznych** – istnieje konieczność monitorowania parametrów wpływających na utratę wymaganego poziomu jakości i bezpieczeństwa,
- **istotnych** – zaleca się wykonywanie pomiarów okresowych, rozszerzonych o analizę trendów,
- **ogólnego przeznaczenia** – najbardziej powszechne rozwiązanie stanowi realizacja pomiarów okresowych, jednakże w wielu przypadkach wystarczające jest przyjęcie metody opartej na czasie (planowane remonty).

Do głównych czynników zaporowych występujących w fazie implementacji różnych programów eksploatacji, technik diagnostycznych, a także sformalizowanych metod identyfikacji awarii lub uszkodzeń należą m.in.:

- kryteria techniczne i technologiczne:
  - zmienność produkcji (pociągająca za sobą konieczność zmian wartości parametrów pracy, modyfikacje urządzeń, przezbrojenia technologiczne itp.),
  - konieczność zachowania wskaźników niezawodności i trafności wnioskowania (przy osiągnięciu minimalnej wartości czasu tej operacji),
  - niski poziom wiedzy i świadomości technicznej (przemawiający na korzyść zastosowania metod wspomaganych komputerowo),
  - ograniczenia zasobów dostępnego sprzętu diagnostycznego, wynikające z potrzeby redukcji kosztów,
- czynniki organizacyjne i socjologiczne:
  - obawa przed wdrożeniem nowych metod,
  - braki w organizacji i planowaniu,
  - niedostateczny poziom wiedzy lub obawa przed pozyskaniem nowych kwalifikacji,
  - zaburzony system pracy zespołowej przejawiający się w braku dzielenia się wiedzą i doświadczeniem,
  - brak wsparcia przełożonych w odniesieniu do wdrażania pomysłów pracowników.

Działania w zakresie identyfikacji przebiegu procesu przemysłowego lub stanów eksploatacyjnych maszyn i urządzeń technologicznych

Działania w zakresie kontroli przebiegu procesu przemysłowego lub stanów eksploatacyjnych maszyn i urządzeń technologicznych, można zakwalifikować do trzech niezależnych grup (Rys. 3).



Rys. 3. Działania w zakresie identyfikacji przebiegu procesu przemysłowego lub stanów eksploatacyjnych maszyn i urządzeń (opracowanie własne: Mariusz Hetmańczyk)

Diagnostyka techniczna może zostać podzielona na dwie niezależne grupy, odnoszące się do:

- **maszyn** - ocena stanu urządzeń przez badania bezpośrednie ich własności i badania pośrednie procesów towarzyszących funkcjonowaniu tych urządzeń, tzw. procesów resztkowych (te mogą mieć charakter mechaniczny, elektryczny, termiczny, itp.),
- **procesów przemysłowych** - rozpoznawanie zmian stanów procesów, których przyczynami są uszkodzenia i inne zdarzenia destrukcyjne (np. zużycie); zadaniem jest wczesne wykrywanie i dokładne rozpoznawanie (rozróżnianie) powstających uszkodzeń.

Predykcja stanów maszyn lub procesów przemysłowych rozumiana jest, jako ogół czynności pozwalających na określenie przyszłych stanów obiektu na bazie zbioru wartości bieżących parametrów.

W przypadku wszystkich grup wymienionych działań wymagana jest dostępność do danych eksploatacyjnych zbieranych z procesu lub maszyny za pomocą monitorowania. Jednak pozyskanie wartości zmierzonych parametrów oraz ich wizualizacja (np. w postaci trendów) nie są czynnikami warunkującymi poprawną identyfikację bieżącego stanu eksploatacyjnego maszyn i urządzeń. Do celów wnioskowania diagnostycznego wymagana jest specjalistyczna wiedza.

Monitorowanie scharakteryzowane jest przez okresowe powtarzanie pomiarów, pozwalające na opracowanie trendów obrazujących zmienność mierzonych parametrów. Najczęściej określa się różne czasookresy pomiarów maszyn:

- ciągły (do celów diagnostyki on-line),
- dzienny, tygodniowy lub miesięczny (na użytek diagnozy off-line; okres pomiaru może być wielokrotnością podstawowej jednostki czasu).

Na rysunku 4 (następna strona) przedstawiono wytyczne doboru metod pozyskiwania danych do celów diagnozy oraz predykcji stanów systemów technicznych (zalety, wady oraz zastosowanie wyodrębnionych podejść).

Metody pozyskiwania danych

Pomiary doraźne (metoda ad-hoc)

Zalety:
- niska wartość całkowitego kosztu wdrożenia,
- łatwość implementacji,
- brak inwazyjności w wartości parametrów i przebieg pracy,
- szybki wynik pomiarów,

Wady:
- niski stopień osiąganej dokładności i jakości,
- ograniczone zastosowanie,
- pomiar dotyczy zazwyczaj tylko jednego parametru,

Zastosowania:
- opracowanie i analiza trendów przebiegów parametrów maszyn,
- pomiar stopnia wydajności pracy, pomiar wartości sił, kontrola poboru energii elektrycznej, temperatury, przepływu itp.

Pomiary krótkoterminowe

Zalety:
- średni poziom wartości kosztów wdrożenia,
- możliwość oszacowania wartości oraz trendu czasowego parametrów,
- szybki wynik pomiarów,

Wady:
- średni poziom złożoności,
- ograniczone zastosowanie,
- zmienność wartości zmierzonych wyników zależna od okresu, wartości czasu pomiaru oraz nastawionych parametrów,
- trudności w implementacji,

Zastosowania:
- badania wydajności oraz opracowanie trendów krótkoterminowych,
- statystyczne zestawienie efektów działania,
- pomiary przenośnymi analizatorami (rejestracja wielkości zmierzonych).

Monitorowanie

Pomiar czasu pracy (okresowe)

Zalety:
- niski lub średni koszt wdrożenia,
- łatwość implementacji,
- brak inwazyjności w przebieg pracy maszyny lub urządzenia,
- najbardziej użyteczne przy warunkach stałego obciążenia maszyn,

Wady:
- ograniczone zastosowanie,
- pomiar dotyczy zazwyczaj wybranego parametru,
- wymaga wykonania kalkulacji czasu pracy (w celu zdefiniowania zakresu zmienności mierzonych parametrów),

Zastosowania:
- wentylatory, pompy, układy grzewcze oraz urządzenia chłodzące,
- często wspierane przez metody pomiarowe z innych grup (np. ad-hoc).

Pomiary długoterminowe

Zalety:
- najwyższa dokładność i jakość,
- możliwość oszacowania wartości oraz zakresu czasowego analizowanego przebiegu,
- możliwa analiza zmienności trendu,
- natychmiastowy dostęp do wyników pomiarów,

Wady:
- wysoki koszt wdrożenia,
- duży stopień trudności na etapie implementacji,

Zastosowania:
- analiza wydajności i trendów długoterminowych,
- urządzenia o wymaganym uzyskaniu wysokiej niezawodności,
- pomiary z dedykowanymi systemami akwizycji danych.

Rys. 4. Metody pozyskiwania danych do celów diagnozy oraz predykcji systemów technicznych

Okres i zakres pomiarów są zależne od zdefiniowanej ścieżki diagnostycznej, użytej metody oraz szybkości propagacji uszkodzeń w konkretnej maszynie. Wnioskowanie diagnostyczne powinno być oparte na minimalnym, ale wystarczającym, zbiorze sygnałów determinującym lokalizację, charakter oraz zasięg rozwijającego się uszkodzenia.

Wdrożenie systemu monitorowania wymaga analizy następujących czynników:

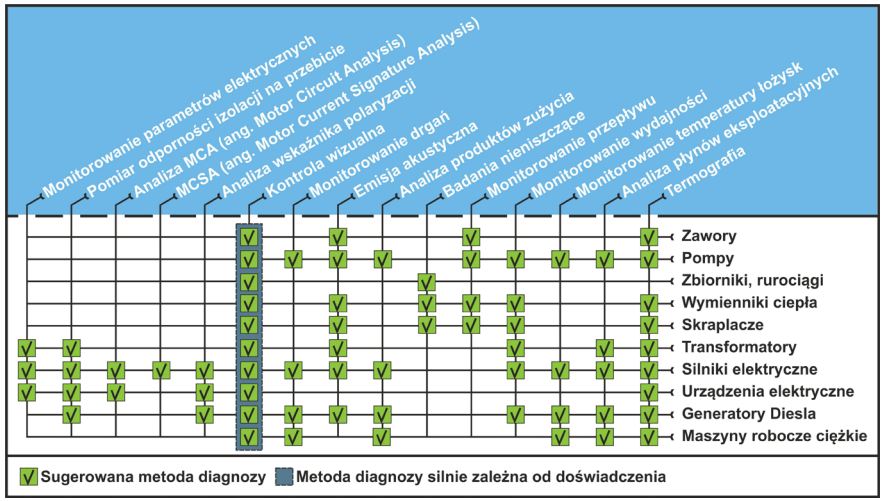
- identyfikacji krytycznych parametrów (w tym typu, zakresu zmienności oraz ich liczby),
- ustalenia charakteru mierzonych sygnałów (temperatura, ciśnienie, przepływ, drgania itp.) determinujących typ wybranych czujników pomiarowych lub całego systemu diagnostycznego,
- identyfikacji zależności pomiędzy monitorowanymi zmiennymi pozwalającymi na określenie bieżącego stanu obiektu (diagnoza),
- określenia przyjętej metody eksploatacji, narzędzi oraz okresu pomiarów.

W ramach procesu monitorowania można użyć wielu zaawansowanych narzędzi pozwalających na kontrolę zmienności parametrów maszyn, w tym:

- systemów SCADA (ang. *Supervisory Control and Data Acquisition*) – nadrzędnym celem jest połączenie funkcjonalności sterowania oraz monitorowania skomplikowanych procesów lub grup maszyn; monitorowanie możliwe jest dzięki zastosowaniu wizualizacji przebiegów parametrów pracy, zdefiniowanie alarmów, skryptów zależnych od zdarzeń,
- paneli operatorskich HMI (ang. *Human Machine Interface*) – sterowanie i monitorowanie pojedynczych maszyn,
- systemów dedykowanych – ukierunkowanych na jeden konkretny obiekt lub grupę obiektów (w tym do monitorowania drgań, emisji akustycznej lub wielu parametrów o różnych źródłach),
- systemów telemetrycznych – zdalne monitorowanie maszyn i urządzeń z zastosowaniem transmisji danych poprzez GPRS oraz raportowaniem w formie serwisu www, e-maili, danych na serwerze ftp oraz SMS-ów,
- sieci przemysłowych z modułami RIOS (ang. *Remote Input Output Station*),
- urządzeń z grupy IIoT (ang. *Industrial Internet of Things*).

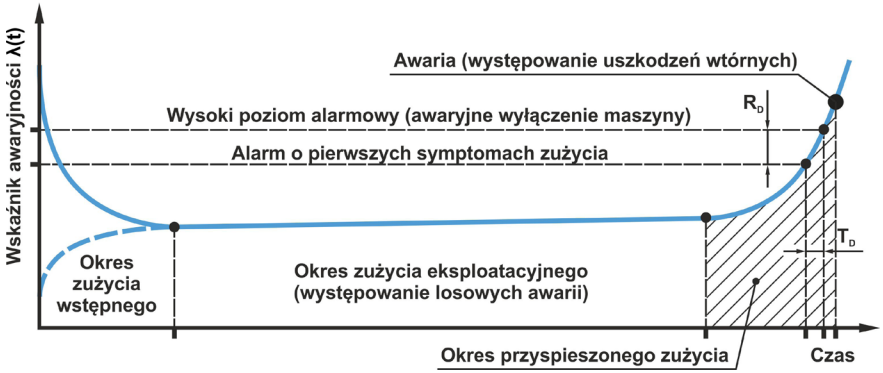
Metody diagnozy układów technicznych

W przeciągu wielu lat rozwoju diagnostyki przemysłowej wypracowano metody stosowane w zakresie różnych urządzeń lub procesów (rys. 5).



Rys. 5. Zestawienie metod technicznych używanych do identyfikacji awarii oraz uszkodzeń wybranych maszyn oraz ich komponentów

Zgodnie z ogólnie przyjętą regułą maksymalnego czasu eksploatacji maszyny (kryterium ekonomiczne) punkt warunkujący znaczne pogorszenie parametrów eksploatacyjnych powinien być zdefiniowany w fazie zużycia przyspieszonego (Rys. 6 na nast. stronie), jednak poniżej zdefiniowanej wartości krytycznej symptomu oznaczającego wystąpienie awarii (eliminacja możliwości wystąpienia awarii lub uszkodzeń wtórnych, tj. propagacji skutków degradacji na elementy sprzężone, redukcja czasu oraz kosztów naprawy).

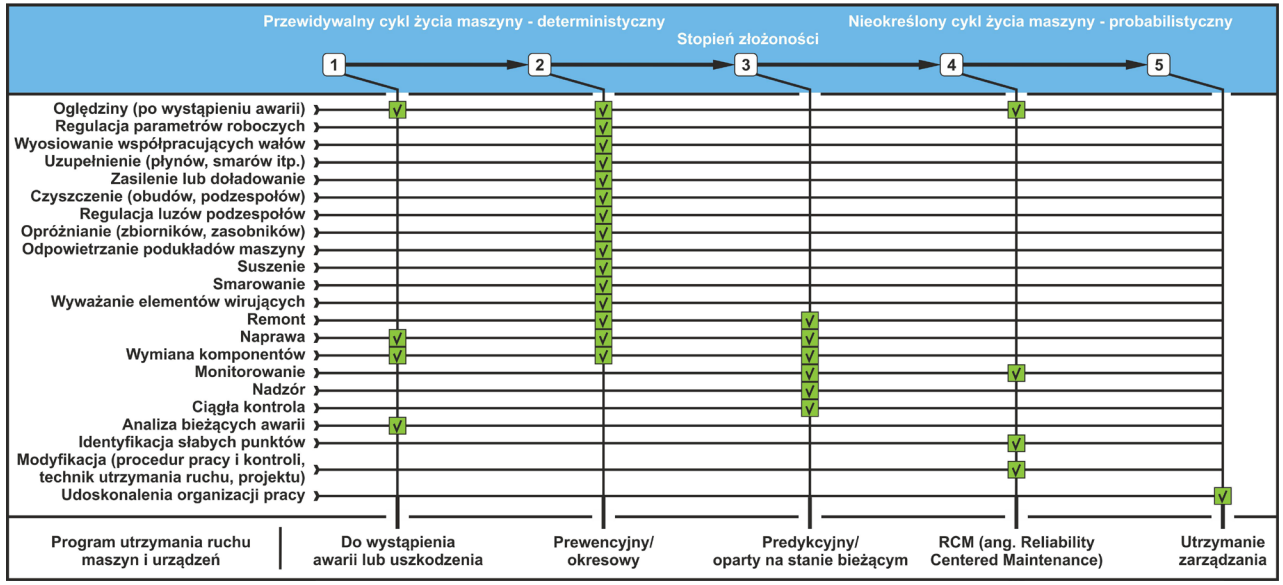


Rys. 6. Krzywa cyklu życia, gdzie: T_D – czas decyzji, R_D – zakres zmienności wartości przesłanek diagnostycznych stanowiących podstawę do oceny stanu

Identyfikacja przekroczenia wartości zdefiniowanych progów alarmowych jest zadaniem o niskim poziomie złożoności. Znacznie trudniejsze jest określenie rezerwy czasu do bezpiecznego zatrzymania urządzenia lub procesu.

Czas decyzji jest definiowany na podstawie zbioru danych, pozyskanych na etapie okresu zużycia eksploatacyjnego (tzw. historia pracy maszyny). Zawartość parametrów zbioru decyzyjnego jest klasyfikowana jako stochastyczna i odnosi się do urządzeń o podobnej konstrukcji przebiegu pracy i charakterze obciążeń zewnętrznych. Czas do awarii można wyznaczyć za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji AI (ang. *Artificial Intelligence*), metod uczenia maszynowego ML (ang. *Machine Learning*) lub innych postaci nowoczesnych algorytmów.

Prawidłowo opracowana historia umożliwia znalezienie optymalnego stanu decyzyjnego pod względem wskaźników jakości pracy maszyny, wymaganego czasu pracy bez awarii (wynikającego z charakteru obsługiwanego procesu i parametrów pracy) oraz minimalizacji prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń wtórnych.



Rys. 7. Czynności oraz metody używane w różnych programach utrzymania ruchu maszyn

Na rysunku 7 przedstawiono główne czynności, wykonywane w ramach szeroko pojętej konserwacji maszyn, oraz zakresy dostępnych programów utrzymania ruchu maszyn.

Większość ze zidentyfikowanych działań konserwacyjnych jest związana z inspekcją wizualną maszyn oraz urządzeń. Wspomniana metoda należy do jednego z najbardziej powszechnych narzędzi wspomagających i występuje we wszystkich programach obsługi. Jednak diagnostyka nowoczesnych urządzeń musi być wspierana przez zaawansowane metody, oprzyrządowanie i doświadczony personel. W zakresie inspekcji wizualnej powszechnie stosowana jest rozszerzona rzeczywistość AR (ang. *Augmented Reality*).

Metody oparte na wiedzy pracowników są jednak nieefektywne i powinny stanowić dodatkowe narzędzie służące do wspomagania diagnostyki obiektów technicznych.

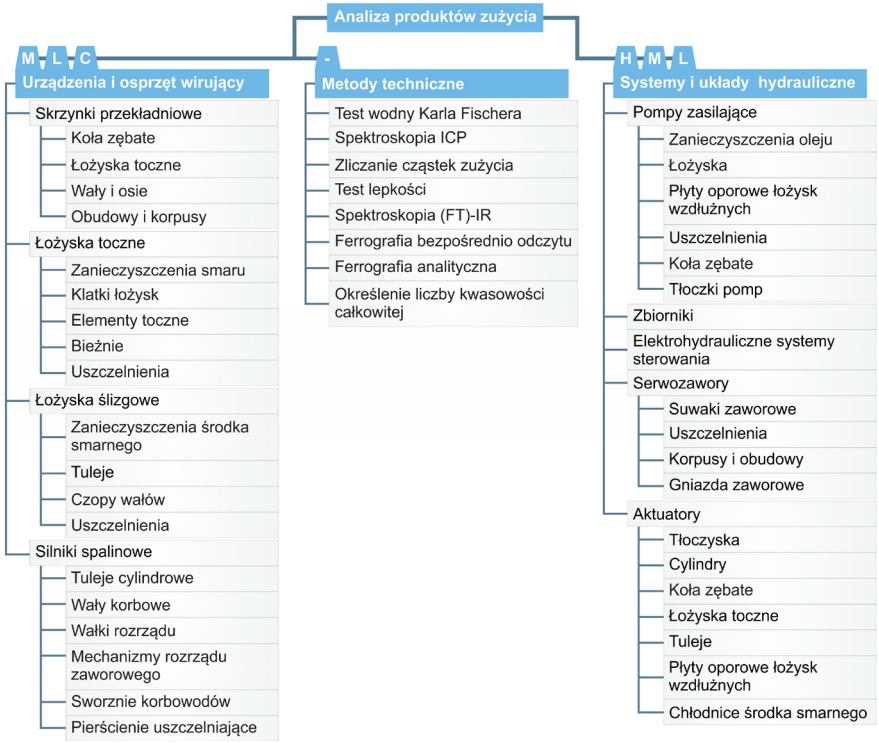
Porównanie wiodących metod i narzędzi diagnostyki technicznej przeprowadzono, opierając się na awariach z podstawowych grup, przyjmujących charakter:

- **mechaniczny** (M) – ubytki lub utrata spójności materiału, zmiany kształtu i formy, wzajemne przemieszczenie elementów połączonych w sposób trwały, zmiana wartości luzów (poluzowanie lub zakleszczenie), odkształcenia spowodowane przez nadmierne wartości sił i momentów itp.,
- **elektryczny** (E) – zaburzenia parametrów zasilania lub zmiana charakterystyki parametrów użytkowych,
- **nieprawidłowości w zastosowanej technice smarowania** (L) – utrata czynnika smarującego, zanieczyszczenia (spowodowane zużyciem eksploatacyjnym lub ciałami obcymi), niedobór lub nadmiar smaru (po smarowaniu wstępnym lub dosmarowaniu) itd.,
- **hydrauliczny** (H) – zjawiska występujące podczas przepływu płynów hydraulicznych (łącznie z napowietrzaniem, kawitacją, przepływem turbulentnym oraz zjawiskami pochodnymi wymienionych czynników),
- **zaburzeń przepływu mediów** (G) – ogół zaburzeń przepływu (cieczy innych niż płyny hydrauliczne oraz gazów),
- **złożony** (C) – zaburzenia w trakcie pracy maszyn, wynikające z połączenia nieprawidłowości sklasyfikowanych w pozostałych grupach (obejmujące także wtórne konsekwencje uszkodzeń pierwotnych).

Pierwszą metodą wspomagania procesu diagnozy jest analiza produktów zużycia (rys. 8), która należy do głównych instrumentów dostosowanych do wymagań programu konserwacji czasowo-zapobiegawczej (tj. z planowaną obsługą). W większości przypadków analizę przeprowadza się w fazie kontroli lub wymiany filtrów oleju lub samego smaru. Wśród dostępnych metod można wymienić grupę testów, przedstawionych na rysunku 8.

Nowoczesne metody umożliwiają identyfikację składu chemicznego cieczy lub obecności produktów zużycia przy jednoczesnej klasyfikacji rodzaju materiału i parametrów koncentracji cząstek (stężenia masowego lub objętościowego).

Wadą, która w wielu przypadkach dyskwalifikuje zastosowanie metody w monitorowaniu, jest konieczność wykonywania skomplikowanych badań laboratoryjnych.



Rys. 8. Zakres zastosowania analizy produktów zużycia

Do grupy bardziej użytecznych metod należy termografia. Pomiary mogą być wykonywane w odmianach pomiaru punktowego (pirometry, termometry kontaktowe i monitory) lub przez obrazowanie termiczne.

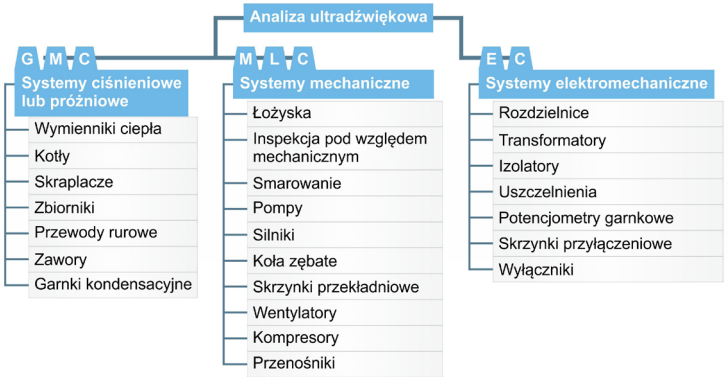
W wielu aplikacjach zmiany parametrów termicznych klasyfikuje się jako wtórne następstwa uszkodzeń mechanicznych, elektrycznych oraz ubytków środka smarnego (rys. 9). W takich przypadkach pomiary temperatury powinny być zaklasyfikowane do grupy przesłanek o złożonym charakterze.

Rys. 9. Zakres zastosowania termografii

Pomiary temperatury umożliwiają identyfikację nieprawidłowości pracy podsystemów elektrycznych, energoelektronicznych, mechanicznych oraz nadzór poprawności realizacji procesu smarowania. Wzrost wartości temperatury stanowi zazwyczaj symptom złożonego problemu (np. ubytek smaru lub nadmiar smaru, powodujące w każdym z przypadków zmianę stanu termicznego).

W związku z opisaną cechą pomiary temperatury wymagają wielokrotnie uzupełnienia o dodatkowe metody, które wzmacniają selektywność przyczyn, leżących u podstaw diagnozowanych uszkodzeń.

Metodą wspomagającą może być analiza ultradźwiękowa, przeznaczona do wykrywania fal dźwiękowych w zakresie częstotliwości 20–100 kHz. Zaletami tej metody są stosunkowo niskie koszty sprzętu, prostota analizy i brak inwazyjności w przebieg pracy. Metoda umożliwia wykrywanie nawet wczesnych etapów rozwoju uszkodzeń, np. w przypadku uszkodzenia łożysk, braku środków smarnych i zapobiegania nadmiernemu smarowaniu (Rys. 10). Wśród wad można wymienić silną zależność wyników pomiaru od szumów tła. Głównym zakresem zastosowania jest identyfikacja wycieków gazów lub cieczy, uszkodzeń o charakterze mechanicznym oraz elektrycznym (przepięcia, iskrzenie, wyładowania łukowe).



Rys. 10. Zakres zastosowania analizy ultradźwiękowej

Do grupy najpopularniejszych wskaźników stosowanych do celów identyfikacji pogorszenia jakości działania maszyn należą parametry drgań.

Do zalet oceny parametrów drgań należą:

- możliwość uzyskania pełnej selektywności identyfikowanych uszkodzeń,
- duża liczba norm technicznych, definiujących procedury pomiarowe oraz kryteria oceny stanu technicznego maszyn, urządzeń i ich komponentów,
- pomiar w szerokim zakresie prędkości obrotowej dzięki możliwości wyboru mierzonego parametru (analizie jest poddawana zmienność przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia),
- **ścisła korelacja pomiędzy stanem technicznym** (definiującym poziom drgań) **oraz temperaturą** (pomiary są zwykle prowadzone z jednoczesną rejestracją i analizą wartości temperatury, głównie w trybie pomiaru punktowego),
- zdefiniowane i dobrze opisane procedury pomiarowe:
  - pomiar wartości RMS (ang. *Root Mean Square*) – wskaźnik ogólnego pogorszenia stanu (stosowany w monitorowaniu okresowym, we wstępnej diagnozie oraz w pomiarach krótko- i długoterminowych),
  - analiza widma – określenie stopnia pogorszenia stanu urządzeń przy jednoczesnej identyfikacji źródła (opartej na analizie charakterystycznych częstotliwości, harmonicznych i wartości ich amplitud).

Częstym przypadkiem w praktyce przemysłowej jest przekroczenie dopuszczalnych progów drgań zdefiniowanych przez normy (np. grupy norm ISO 10816 oraz ISO 7919), które to przekroczenia nie powodują jednak przyspieszonego zużycia maszyn. Zaistnienie takiego stanu rzeczy wymusza konieczność głębszej analizy.

W wielu przypadkach stan nowo zainstalowanych maszyn traktuje się jako punkt odniesienia do dalszej oceny. W przypadku spełnienia wszystkich wymagań (montażowych, konfiguracyjnych oraz eksploatacyjnych) można posłużyć się bieżącymi parametrami pracy nowych maszyn, jako wartościami wzorcowymi. Nieprawidłowości mogą pojawić się w każdym elemencie (niewłaściwe usadowienie maszyn, parametry zasilania, luźne połączenia mechaniczne, niedokładności wykonania itp.). Należy więc mieć na uwadze trzy podstawowe grupy błędów związanych z etapami: konstrukcji, montażu oraz eksploatacji wstępnej.

Rys. 11. Zakres zastosowania analizy drgań

W zakresie wskazanych narzędzi można wyodrębnić metody diagnostyczne, które cechują się różnym poziomem złożoności oraz zaawansowaniem (Tab. 5).

Tab. 5. Przegląd dostępnych technik w ramach metody oceny stanu zgodnej z założeniami PdM

TECHNIKI PDM	ANALIZOWANE ELEMENTY/PARAMETRY
Analiza stanu środków smarnych oraz produktów zużycia	• zliczanie cząstek oraz ferrografia (z czujnikami do odczytu bezpośredniego oraz analityczna), • spektroskopia emisyjna oraz w podczerwieni, • analiza wyglądu lub zapachu oraz udziału procentowego faz stałej i ciekłej, • pomiary lepkości czynnika smarnego, • metody TAN (ang. *Total Acid Number*) oraz TBN (ang. *Total Base Number*).
Termografia	• analiza obrazów cieplnych (termogramów) w paśmie średniej podczerwieni (9÷14 µm), • rejestracja promieniowania cieplnego oraz dokładny pomiar temperatury obiektów technicznych.
Analiza ultradźwiękowa	• rozchodzenie się fal sprężystych, odbicie, przenikanie, rozpraszanie, tłumienie, dyfrakcja fal, • amplituda fali odbitej i przenikającej, czas przejścia fali, kształt sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości.
Metody wizualne – penetracyjne barwne lub fluorescencyjne	• wnikanie cieczy w szczeliny powierzchniowe (pęknięcia), • określenie wymiarów powierzchniowych (długość i szerokość) pęknięć.
Badania nieniszczące	• badania lub obrazowanie ultradźwiękowe, • badania z użyciem penetratorów (pęknięcia powierzchniowe), • próby szczelności, • defektoskopia radiologiczna oraz magnetyczna proszkowa, • testowanie metodą prądów wirowych.

TECHNIKI PDM	ANALIZOWANE ELEMENTY/PARAMETRY
Monitorowanie parametrów elektrycznych	• badania odporności na przepięcie obwodów elektrycznych, • analizy MCA (analiza kształtu przebiegu, rejestracja zakłóceń, analiza przebiegów przejściowych) oraz MCSA, • termografia aktywna, • analiza spektrum natężenia prądu silnika, • pomiary rezystancji oraz impedancji, • analiza stanu oleju transformatorowego, • reflektometria (analiza w dziedzinie czasu), • analiza prądów oraz czasów rozruchu/hamowania, • analiza współczynnika mocy oraz zniekształceń harmonicznych przebiegu natężenia prądu.
Monitorowanie drgań	• pomiar RMS (ocena poziomu drgań łożysk), • analiza widma FFT (łożyska, przekładnie, wentylatory, pompy, turbiny, napędy; identyfikacja postępu zużycia, niewyważenia, rozosiowania maszyn), • analiza obwiedni (łożyska oraz przekładnie zębate), • analiza cepstrum (łożyska oraz przekładnie zębate), • analiza sygnału czasowego (losowe sygnały drganiowe), • analiza orbity (wały oraz osie). • pomiar fazy (wyodrębnienie z widma FFT częstotliwości odpowiadających niewyważeniu, błędów osiowania, nadmiernych luzów maszyn), • metoda impulsów uderzeniowych SPM (ang. *Shock Pulse Method*; ocena stanu łożysk), • analiza widma różnicowego (analiza porównawcza widm; różne urządzenia i maszyny), • badania rezonansowe (identyfikacja częstotliwości własnych maszyn i konstrukcji mechanicznych).

Podsumowanie

Skuteczność modelu predykcyjnego UR jest ściśle uzależniona od wiedzy wymaganej na etapach:

- planowania struktury fizycznej modelu – w zakresie klasyfikacji maszyn, doboru metody pozyskiwania danych procesowych, identyfikacji kluczowych parametrów oraz określenia efektywności zastosowanych narzędzi, w tym przybliżonego okresu zwrotu nakładów inwestycyjnych, kosztu użytkowania narzędzi, szkoleń pracowników itp.,
- wdrożenia – odnoszącego się do prawidłowego skonfigurowania systemu (z warunkiem uwzględniającym uzyskanie odporności na zakłócenia), określenie ścieżki diagnostycznej oraz okresu pomiarów,
- użytkowania – w zakresie ogółu wiedzy oraz doświadczenia pozwalających na określenie przybliżonego czasu do wystąpienia awarii oraz wnioskowania w obszarze potencjalnych przyczyn, lokalizacji oraz obszaru rozwoju awarii lub uszkodzenia.

15 kroków do wdrożenia programu predykcyjnego utrzymania ruchu maszyn i urządzeń PdM

Wdrożenie programu eksploatacji PdM obejmuje w uproszczeniu następujące kroki:

- **identyfikację potrzeb** – określenie dotychczasowej awaryjności oraz przebiegu pracy obiektów objętych programem (np. na bazie wskaźników KPI), liczby oraz zakresu zmienności parametrów jednoznacznie identyfikujących stan analizowanego obiektu,
- **analizę zasadności oraz obszaru wdrożenia** - z klasyfikacją maszyn oraz oceną alternatywnych metod rzutujących bezpośrednio na możliwość poprawy stanu bezpieczeństwa, jakości oraz wydajności produkcji,
- **wykonanie zestawień** (wyposażenia, procedur, wymagań) **oraz określenie kosztów wdrożenia** – etap decyzyjny, w którym może nastąpić zmiana wcześniej przyjętych założeń,
- **wdrożenie** – etap wymaga zdefiniowania toku postępowania umożliwiającego implementację sprzętu i wyposażenia, z jednoczesną możliwością okresowego spadku jakości lub wydajności maszyn lub linii,
- **ocenę oraz korektę** – kontrola (działania oraz efektów) pozwalająca na identyfikację słabych punktów zastosowanych rozwiązań i ich eliminację.

Budowa poprawnie funkcjonującego programu predykcyjnego utrzymania ruchu PdM jest złożonym zadaniem, które obejmuje również konieczność uwzględnienia informacji zawartych w dokumentacji, normach i standardach. Do zbioru podstawowych elementów należy dokumentacja:

- techniczno-ruchowa – obejmująca: zestawienie parametrów technicznych, rysunki (wykonawcze i złożeniowe), wykazy (wyposażenia normalnego i specjalnego), schematy (zabudowy, kinematyczne, elektryczne oraz pneumatyczne), instrukcję (użytkowania, obsługi, konserwacji i smarowania, BHP), zalecane normatywy remontowe producenta, wykazy (części zamiennych oraz zapasowych),
- przebiegu eksploatacji – zawierająca historię przebiegu pracy maszyny, doświadczenia pracowników służb utrzymania ruchu oraz operatorów,
- zakresu oraz spodziewanych wartości monitorowanych zmiennych – czasami odbiegających od normatywów.

Zaprojektowanie przebiegu wdrożenia programu PdM powinno zostać poprzedzone wykonaniem szczegółowego planu działań (Tab. 6).

Tab. 6. Plan wdrożenia programu predykcyjnego utrzymania ruchu PdM

KROK	ZAKRES AKTYWNOŚCI	DZIAŁANIA
1.	**Wstępna ocena potrzeb**	• analiza historii maszyn i wyposażenia, • analiza dostępnych danych (wybranych kategorii strat związanych z: przestojami, awariami, prędkościami (np. obróbki), regulacjami (uzbrojeniem), zauważonymi wadami produkcyjnymi i działaniem, rozruchem i wydajnością, krótkimi przestojami, stratami dochodu, stratami energetycznymi, wypadkami w miejscu pracy), • ustanowienie spójnych i jednoznacznych definicji (pojęć stosowanych w zakresie rozwijanych zagadnień), zasad i wzorców postępowania, • opracowanie przypadków zastosowań.
2.	**Przeprowadzenie szkoleń kadry zarządzającej i wprowadzenie zasady ogólnego zaangażowania**	• szkolenia powinny odbyć się na bazie zasobów oraz doświadczeń własnych (odniesienie do konkretnych przypadków występujących w zakresie danego zakładu produkcyjnego/wydziału/lub jego komórki organizacyjnej), • przedstawienie korzyści (dostosowanych pod względem charakterystyki grup pracowników; korzyści ekonomiczne, wzrost bezpieczeństwa, polepszenie warunków pracy, inne) z wdrożenia PdM oraz przybliżonych okresów zwrotu nakładów inwestycyjnych, • zaplanowanie i uzyskanie zgody na wystarczające, dedykowane i wykwalifikowane zasoby osobowe (inżynierów, techników, menadżerów, pracowników produkcji) zaangażowanych do projektowania programu, wdrożenia i ciągłego doskonalenia wdrążanego rozwiązania.
3.	**Ustalenie systemu identyfikacji maszyn i wyposażenia**	• ustanowienie spójnego systemu identyfikacji sprzętu i wyposażenia w ramach całego zakładu – dotyczy maszyn poddawanych monitoringowi oraz dostępnego zasobu urządzeń diagnostycznych (dostępnych w zasobach), • opracowanie jednoznacznego systemu opisu i kryteriów klasyfikacji maszyn (do grup maszyn krytycznych, istotnych i ogólnego przeznaczenia).
4.	**Ocena możliwości polepszenia stanu maszyn i wyposażenia**	• analiza stopnia złożoności planu konserwacji maszyn i urządzeń w stanie obecnym oraz możliwości wprowadzenia usprawnień obecnego stanu (działanie powinno doprowadzić do wyodrębnienia czynności, które można wyeliminować lub znacząco usprawnić), • analiza planu włączenia wybranych maszyn i urządzeń do programu PdM oraz wstępna ocena kosztu, • rozważenie alternatyw w zakresie programów do utrzymania ruchu maszyn i urządzeń.
5.	**Wybór maszyn i wyposażenia objętego programem pilotażowym**	• zastosowanie metody małych kroków (wskazanie zalet programu pilotażowego z jednoczesnym planem rozszerzenia na szerszy zakres, możliwe zastosowanie analizy Pareto), • wybór maszyn i wyposażenia krytycznego (tj. urządzeń, do których cech można zaliczyć: duże czasy przestojów awaryjnych; wysokie koszty utrzymania, konserwacji oraz naprawy; awarie powodujące poważne w skutkach uszkodzenia innego sprzętu lub infrastruktury; zagrożenie bezpieczeństwa lub zdrowia pracowników; niewystarczającą niezawodność do obsługi programu JIT – ang. *Just-in-Time*), • wybór rozwiązania alternatywnego (analiza zasadności włączenia konkretnego sprzętu do zasobów krytycznych; analiza kosztów - wykonanie porównania kosztów eksploatacyjnych prowadzonych w ramach obecnego standardu konserwacji, w stosunku do nowo wdrażanego rozwiązania; określenie stopnia wpływu awarii analizowanej maszyny lub wyposażenia na przestój), • identyfikacja klas maszyn o podobnych cechach, które mogą zostać objęte opracowanym programem pilotażowym – wstępne opracowanie standardu w przypadku maszyn o podobnych cechach eksploatacyjnych lub/i technologicznych.
6.	**Definicja ogólnych warunków programu**	• ustalenie zasad, koncepcji, zakresu, definicji, celów końcowego i pośrednich (tzw. kamieni milowych).

Tab. 6. Plan wdrożenia programu predykcyjnego utrzymania ruchu PdM (cd.)

KROK	ZAKRES AKTYWNOŚCI	DZIAŁANIA
7.	**Opracowanie szczegółów programu, w odniesieniu do systemu lub jego komponentów**	• zebranie wymaganych dokumentów wsadowych, • wykonanie analizy FMMA (ang. *Failure Mode and Maintenance Analysis*) – w celu ustalenia mechanizmów i warunków monitorowania (analiza historii eksploatacji oraz przestojów, wykonanie przeglądu projektu w celu identyfikacji mechanizmów powstawania awarii, symptomów – fizycznych oznak wskazujących na nieprawidłowości pracy), • ewaluacja używanego planu eksploatacji, • opracowanie zarysu najbardziej odpowiedniego typu programu eksploatacji (pod względem następujących czynników: możliwość wdrożenia nadzoru oraz monitoringu, w porównaniu do planowanych przeglądów; eliminacja nadmiernej liczby inspekcji; inspekcje zapobiegawcze, w porównaniu do kontroli predykcyjnej), • identyfikacja punktów oraz zakresu inspekcji (w szczególności: symptomów wskazujących na rozważaną awarię, tj. będącą przedmiotem przeglądu; metod identyfikacji symptomów awarii; przydatnych metod identyfikacji; okresu czasu przewidywanego na rozwoju awarii; wpływu występowania awarii na okres pomiędzy przeglądami; przygotowanie oraz sprawdzenie: standardów wdrażanych praktyk, instrukcji i arkuszy kontrolnych wszystkich prac nowego planu (kontrole, smarowanie, korekty i wymiany części); ustalenie kryteriów każdej z monitorowanych zmiennych, w tym określenie parametrów ilościowych (dopuszczalnych warunków / limitów); określenie czynności możliwych do wykonania przez operatorów, • zastosowanie statystycznych arkuszy kontrolnych procesu / jakości, • rozważenie alternatyw kosztowych, w zakresie: • ekonomii zastosowania dostępnego wyposażenia (redundantnego sprzętu, czujników procesowych, systemów SCADA, HMI, urządzeń sterujących), • niezawodności - poprzez analizę możliwości zastosowania, w wybranych urządzeniach lub procesach, metod eksploatacji warunkujących bezawaryjne działanie pomiędzy planowanymi przeglądami / wymianami (opcja bez przeglądów międzyokresowych); w przypadku urządzeń redundantnych baza danych historycznych powinna umożliwiać wiarygodne przewidywanie zużycia; w przypadku braku możliwości określenia dokładnego postępu zużycia należy rozważyć instalację stałych urządzeń do monitorowania predykcyjnego (pomiar drgań, temperatury, ciśnienia itp.), • analiza zasadności wdrożenia sprzętu diagnostycznego wymaganego do działania nowego programu eksploatacji (opcja wykonania pomiarów podczas pracy urządzenia – identyfikacja użyteczności mierzonych parametrów eksploatacyjnych do celów diagnozy; analiza czasu trwania przestojów oraz możliwości całkowitej eliminacji osprzętu diagnostycznego), • zdefiniowanie poziomu krytyczności wdrażanego programu w ramach rozważanego wyposażenia lub maszyny (np. krytyczny, kluczowy, preferowany), • opracowanie zakresów czynności i tras inspekcji, w celu uzyskania korzyści z logicznego grupowania i sekwencjonowania działań, • ustalenie częstotliwości i harmonogramu przeglądów oraz pomiarów (planowane - zrównoważone przez cały rok, pływające - stały interwał czasowy, monitorowanie on-line), • określenie wymagań dotyczących zasobów (w zakresie: nakładów pracy - liczebności załogi, czasu trwania i godzin pracy; materiałów, narzędzi i sprzętu; dostępu do sprzętu), • ustalenie osób lub zespołów odpowiedzialnych za wykonanie opracowanych procedur, • przygotowanie powiązanych zleceń pracy, • wykonanie podsumowania opracowanego planu konserwacji.

Tab. 6. Plan wdrożenia programu predykcyjnego utrzymania ruchu PdM (cd.)

KROK	ZAKRES AKTYWNOŚCI	DZIAŁANIA
8.	**Organizacja wydajnego programu**	• opracowanie planu programu określającego funkcje, obowiązki, potrzeby szkoleniowe i sprzętowe, wymagania budżetowe itp. (w tym: całkowite obciążenie, niezbędny personel, kwalifikacje załogi), • połączenie programu z systemem planowania, • określenie odpowiedzialności za opracowanie zleceń naprawczych wynikających z inspekcji, • eliminacja nadmiernych i uciążliwych szczegółów administracyjnych (formalności), • kontrola wstępna harmonogramu zgodności w zakresie konserwacji zapobiegawczej i naprawczej pod względem prognozowanego działania (początkowo powyżej 85%, ostatecznie powyżej 95%).
9.	**Przedstawienie programu kierownictwu, operatorom i serwisantom**	• uzyskanie zgody kierownictwa.
10.	**Ulepszenie sprzętu do utrzymania stanu założonego w planie**	• ustalenie priorytetów • pozyskanie ofert dostawców, • uzyskanie zgody kierownictwa, • modernizacja sprzętu (według założonych priorytetów), • ponowne uruchomienie zmodernizowanego sprzętu, • aktywacja programu nadzoru sprzętu i wdrażanie opracowanych działań naprawczych.
11.	**Przeprowadzenie niezbędnych szkoleń**	• szkolenia w zakresie konkretnych zagadnień teoretycznych (uświadamianie, rozwój kompetencji) oraz przydatnych umiejętności praktycznych.
12.	**Konfiguracja historii obsługi maszyn i wyposażenia**	• zbieranie danych i zapisów dotyczących wykonanej pracy, w zakresie wdrażanego programu eksploatacji (w tym również kosztów), • opracowanie wzorców dokumentacji zakończonych zleceń pracy i wynikających z nich zleceń naprawczych.
13.	**Utworzenie lub zakup skomputeryzowanego programu dopasowanego do potrzeb programu eksploatacji**	• wybór narzędzia do planowania terminów i zakresu przeglądów w formie systemu CMMS (ang. *Computerised Maintenance Management Systems*) – przy jednoczesnym założeniu, że komputerowo wspomagane zarządzanie utrzymaniem ruchu wpływa na ograniczenie liczby awarii, ale nie prowadzi do ich całkowitej eliminacji.
14.	**Uruchomienie programu**	• sprawdzenie działania oraz założonych efektów.
15.	**Zainicjowanie przeglądu dostępnych metod inżynierii niezawodności**	• opracowanie testów definiujących parametry eksploatacyjne i zasady kolekcjonowania danych, • analiza raportów zakończonych zleceń i napraw, w celu określenia obszarów o wysokich kosztach, • ustanowienie metodologii nadzoru trendów i analizy danych w celu sformułowania zaleceń, • koncentracja uwagi inżynierów na kluczowych obszarach, • ustanowienie procesu oraz kryteriów oceny, w celu dostrojenia przyjętego programu (ustalenie standardów wydajności, w odniesieniu do każdego urządzenia; dostosowanie częstotliwości inspekcji na podstawie doświadczeń fazy pilotażowej lub historii eksploatacji; optymalizacja metody inspekcji i wprowadzenie zaawansowanych metody inspekcji; przeprowadzenie okresowych przeglądów sprzętu zakwalifikowanego do programu i ewentualne usunięcie urządzeń nie wymagających zastosowania wdrożonego podejścia; usuniecie z programu lub dodanie do niego wyposażenia i urządzeń uznanych za wymagane), • przedstawianie problemów i rozwiązań zaangażowanemu personelowi, • kontrola warunków rozwoju i kosztów wdrożonego programu.

Podsumowanie

Wdrożenie programu PdM jest możliwe w trzech wzajemnie uzupełniających się wariantach:

- **nadzoru trendów** – diagnoza oparta na bazie przekroczenia zdefiniowanych progów alarmowych oraz wiedzy pracowników lub algorytmów, co wymusza konieczność wykonania pomiarów w stałych odcinkach czasu oraz okresowej kontroli metodami nieinwazyjnymi,
- **pomiarów jakościowych** – diagnoza oparta na wiedzy operatora, a częstotliwość pomiaru uzależniona od wizualnej oceny pogorszenia parametrów pracy maszyny,
- **pomiarów ilościowych** – opartych na metodzie CM (ang. *Condition Monitoring*) obejmującej rejestrację parametrów on-line, ich archiwizację oraz analizę.

Jeżeli zespół wdrażających model PdM charakteryzuje się wysoką znajomością maszyn, można opracować system diagnostyczny oparty na monitorowaniu on-line oraz regułami diagnostycznymi zdefiniowanymi przez służby utrzymania ruchu. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość użycia uniwersalnych narzędzi, które mogą być konfigurowane oraz swobodnie rozbudowywane (w miarę potrzeb) według bieżących wymagań użytkownika. W opracowaniu systemu pozyskiwania danych procesowych należy zwrócić uwagę na:

- architekturę rozważanego systemu urządzeń i maszyn:
  - scentralizowaną – możliwość zastosowania lokalnej wizualizacji danych w postaci paneli HMI i procedur diagnostycznych zapisanych w sterowniku PLC,
  - rozproszoną – z zastosowaniem systemów SCADA, modułów IO oraz magistral sieci przemysłowych, aplikacji chmurowych,
- czujniki pomiarowe – wybór czujników procesowych powinien uwzględniać charakter mierzonej wielkości (temperatura, ciśnienie, przepływ, przemieszczenie itp.), wyposażenie w interfejsy sieciowe, dokładność, sposób pomiaru, konieczność kalibracji oraz zakupu dodatkowego oprzyrządowania,
- dostępność do wartości lub zmienności wartości mierzonych parametrów: punktowa (kontrolki, wyświetlacze, wieżyczki sygnalizacyjne) lub zdecentralizowana (z użyciem magistral sieci przemysłowych oraz urządzeń IIoT).

Niniejsze opracowanie ma jedynie charakter informacyjny i nie może stanowić podstawy do jakichkolwiek roszczeń związanych z decyzjami gospodarczymi podejmowanymi w związku z powyższymi treściami. Autor ani Fundacja Platforma Przemysłu Przyszłości nie ponosi odpowiedzialności za konsekwencje decyzji biznesowych podejmowanych przez podmioty korzystające z opracowania, a wszelkie ryzyko związane z takimi decyzjami ponosi podmiot je podejmujący.