

Utrzymanie ruchu a Przemysł 4.0

Ryszard Nowicki

1. Wprowadzenie

Utrzymanie ruchu (UR) to codzienna, systematyczna praca, związana z wykonywaniem zadań w celu zapobiegania degradacji stanu technicznego maszyn i urządzeń oraz występowaniu awarii, a gdy już do nich dojdzie – usuwanie degradacji w celu przywrócenia środowiska produkcji ich możliwie najlepszej funkcjonalności.

Strategia eksploatacji maszyn to świadomie dobrany i zaplanowany proces obsługi i zbiór zasad postępowania w odniesieniu do poszczególnych elementów wyposażenia zakładu – w tym przede wszystkim środków produkcji.

W praktyce wykorzystywane są trzy następujące strategie wspomagające UR:

- strategia pracy do uszkodzenia;
- strategia planowo-zapobiegawcza;
- strategia eksploatacji bazująca na stanie technicznym (CBM¹).

Na problematykę UR można patrzeć zarówno od strony pojedynczej maszyny lub pojedynczego urządzenia, jak i od strony całego przedsiębiorstwa i wszystkich środków produkcji zaangażowanych na rzecz realizowanego procesu produkcyjnego. W obu przypadkach, celem zapewnienia wymaganej dostępności środków produkcji, ocenie musi podlegać ich stan techniczny. Ocena ta może być realizowana w odniesieniu do tzw. integralności mechanicznej oraz do sprawności termodynamicznej. W obu przypadkach podstawą oceny są pomiary różnych wielkości fizycznych, które następnie mogą podlegać mniej lub bardziej zaawansowanej analizie.

Celem artykułu jest omówienie współczesnych możliwości w zakresie systemów wspomagania UR przedsiębiorstw oraz postępu, który dokonał się w zakresie dostępnych na tę okoliczność narzędzi w czasie minionej dekady.

2. Rewolucje przemysłowe i ich wpływ na UR

W dotychczasowej historii przemysłu już kilkakrotnie dało się zaobserwować

burzliwe pojawienie się nowych technologii, które fundamentalnie wpływały na efektywność produkcji, a także prowadziły do znaczącego postępu w zakresie stosowania bardziej efektywnego UR.

Przemysł 1.0 – mechanizacja

Upowszechnienie napędów (turbiny wodne i silniki parowe) wprowadza produkcję w erę industrializacji.

Przemysł 2.0 – elektryfikacja

Silniki elektryczne wypierają tłokowe napędy parowe, prowadząc do produkcji wielkoseryjnej z zastosowaniem linii produkcyjnych². Celem zapewnienia płynności produkcji takich linii zaczęto stosować remonty planowo-zapobiegawcze. W drugiej połowie XX wieku szczególnie ważne środki produkcji zaczęto nadzorować z pomocą analogowych systemów monitorowania i zabezpieczeń.

Przemysł 3.0 – cyfryzacja³

Ma miejsce wprowadzenie programowalnych sterowników logicznych (PLC⁴) oraz komputeryzacji do automatyzacji produkcji przemysłowej. Automatyzacja przyczynia się do zwiększenia wydajności maszyn, zwiększenia precyzji produkcji oraz do poprawy jej elastyczności. Postępujący proces cyfryzacji umożliwia osiągnięcie coraz wyższego poziomu automatyzacji. Zaczynają powstawać systemy planowania i kontroli, których celem jest koordynacja działań w obrębie produkcji.

W 1965 roku J.W. Cooley wraz z J.W. Tukey'em publikuje artykuł prezentujący algorytm szybkiej estymacji widma zespolonego z wykorzystaniem metod cyfrowych, co owocuje kilkanaście lat później zastosowaniem skomputeryzowanych systemów w celu bardziej efektywnej analizy sygnałów dynamicznych na rzecz rozpoznawania zmian stanu technicznego. W ostatnim dziesięcioleciu minionego wieku systemy cyfrowe

zastępują analogowe systemy nadzoru i zabezpieczenia maszyn.

Przemysł 4.0 – usieciowienie⁵

Postępuje integracja ludzi oraz sterowanych cyfrowo maszyn z Internetem i technologiami informacyjnymi. Materiały wykorzystywane do produkcji oraz półprodukty i produkty są coraz łatwiej i lepiej identyfikowalne, a także realna staje się możliwość wzajemnego komunikowania się między nimi. Przepływ danych/informacji jest realizowany dwukierunkowo w pionie: z poszczególnych komponentów do działu IT⁶ przedsiębiorstwa oraz z działu IT do komponentów. Drugi kierunek przepływu informacji jest realizowany w poziomie, tzn. między maszynami zaangażowanymi w proces produkcji a systemem produkcyjnym przedsiębiorstwa.

Na Przemysł 4.0 składają się w zasadzie trzy główne komponenty i czwarty pomocniczy:

1. **Internet Rzeczy (IoT – Internet of Things)** oraz systemy CPS (*Cyber-Physical Systems*) – tu należy wymienić czujniki, mierniki, analizatory oraz urządzenia mobilne (takie jak np. zbieracze danych, smartfony, tablety) oraz „wearables” (tzn. urządzenia noszone przez pracownika jako element garderoby, mogące także monitorować kondycję operatorów podczas pracy); dane gromadzone z pomocą wszystkich tych urządzeń są przesyłane do centralnej bazy danych.
2. **Duża liczba danych (Big Data)** – wzrasta potrzeba ich obsługi, co przejawia się dążeniem do opracowania specjalizowanych narzędzi umożliwiających prowadzenie zaawansowanych analiz, umożliwiających konwersję danych w informacje użyteczne dla systemu produkcyjnego (dotyczące tak środków produkcji, jak i pracowników); narzędzia wykorzystywane do zaawansowanych

analiz mogą być uniwersalne bądź też zorientowane aplikacyjnie.

3. **Chmura obliczeniowa** – przetwarzanie w chmurze ma kluczowe znaczenie dla dalszego rozwoju Przemysłu 4.0; technologia chmurowa pomaga gromadzić i centralizować dane oraz informacje przypisane do firmy, oferując jednocześnie platformę do współpracy typu *open source*, co prowadzi do przyspieszenia oraz ulepszenia analiz i w konsekwencji ma skutkować uzyskaniem korzyści dla całej, wykorzystującej to podejście, branży; pojęcie „chmury” nie jest jednoznaczne; w szerokim znaczeniu „chmura” to wszystko to, co jest gromadzone oraz przetwarzane na zewnątrz zapory sieciowej przedsiębiorstwa, w tym także z pomocą konwencjonalnego outsourcingu.
4. Infrastruktura komunikacyjna umożliwiająca bardziej zaawansowaną automatyzację produkcji przemysłowej przy wykorzystaniu mikrokontrolerów do sterowania maszynami, systemów z obszaru IT do planowania i sterowania produkcją etc.

Korzyściami płynącymi z wejścia na drogę Przemysłu 4.0 są: obniżenie kosztów, poprawa efektywności produkcji (większa prędkość i skala produkcji), a także lepsza jakość produktów i usług.

3. Struktura współczesnego systemu nadzoru stanu

Na kompletne rozwiązanie systemowe wspomagające ocenę stanu maszyny składają się współcześnie następujące elementy:

- czujniki umożliwiające prowadzenie pomiarów;
- systemy monitorowania i zabezpieczeń (SM&Z);
- systemy akwizycji i prezentacji danych diagnostycznych;
- systemy inteligentnego przetwarzania danych w informacje użyteczne dla UR (a także produkcji);
- system przekazywania informacji do innych systemów wykorzystywanych w przedsiębiorstwie; ten szczytowy moduł rozwiązania systemowego stanowi element zwany systemem zarządzania majątkiem⁷.

4. Fundament systemu: czujniki

Czujniki są podstawowym elementem systemu umożliwiającego każdą inną formę UR niż „pracuj do awarii i naprawiaj”. Za hasłem „czujniki” kryje się *de facto* znacznie więcej, bowiem także niezbędna wiedza techniczna związana:

- z doбором czujnika (np. mamy dziesiątki różnych czujników drgań mechanicznych i musi je coś różnić poza jakością, tak że pewne z nich nadają się bardziej do jakiejś aplikacji, a inne mniej); w krajowej (i nie tylko) praktyce można znaleźć wiele czujników dobranych do aplikacji niepoprawnie, a czasami wręcz błędnie; czujniki błędnie dobrane nie będą dostarczać dla UR danych, o których można powiedzieć, że są symptomami stanu technicznego;
- ze sposobem ich zainstalowania; w przedsiębiorstwach, oprócz czujników zainstalowanych poprawnie, można znaleźć np. wiele czujników drgań oraz temperatury, które są zainstalowane trochę lub całkowicie niepoprawnie; czujniki źle zainstalowane nie będą dostarczać dla UR danych mogących realnie wspomagać ocenę stanu technicznego maszyny;
- z mnogością i rodzajem wykorzystywanych czujników w zależności od planowanej formy UR; zauważmy, że w szeregu przypadków dla identycznego środka produkcji może być wykorzystywany różny zestaw czujników w zależności od jego krytyczności dla realizowanego procesu produkcyjnego.

W piśmiennictwie technicznym można coraz częściej znaleźć opisy czujników, które dodatkowo są określane mianem inteligentnych (w piśmiennictwie angielskim: *intelligent sensor*, *smart sensor* etc.). Nazewnictwo to ma skusić mniej obytego użytkownika nabywcem takich właśnie produktów, które przez domniemanie mają wydawać się lepszymi od czujników pozbawionych takiego określenia (czyli, przez domniemanie, „czujników nieinteligentnych”). Czy czujniki inteligentne prezentują dla UR lepsze cechy niż czujniki tradycyjnie stosowane w przeszłości? Otóż niekoniecznie! Dla większości bardziej zaawansowanych form UR tradycyjne rozwiązanie systemu monitorowania,

reklama

reklama

wykorzystujące tradycyjne czujniki, jest w dalszym ciągu rozwiązaniem technicznie lepszym. W tym przypadku wszystkie (tzw. inteligentne) funkcje czujników są realizowane przez system monitorowania, do którego są one podłączone. Czujniki inteligentne mogą być rozpatrywane jako alternatywa w przypadku prewencyjnego UR maszyn pomocniczych, w którym (najlepiej świadomie) rezygnuje się z typowych systemów monitorowania na rzecz ograniczonej funkcjonalności systemu monitorowania, realizowanej przez któryś z elementów systemu sterowania produkcją. Tak więc warto pamiętać, że współczesny system monitorowania z podłączonymi do niego czujnikami zawsze może więcej niż „inteligentne czujniki” podłączone do DCS.

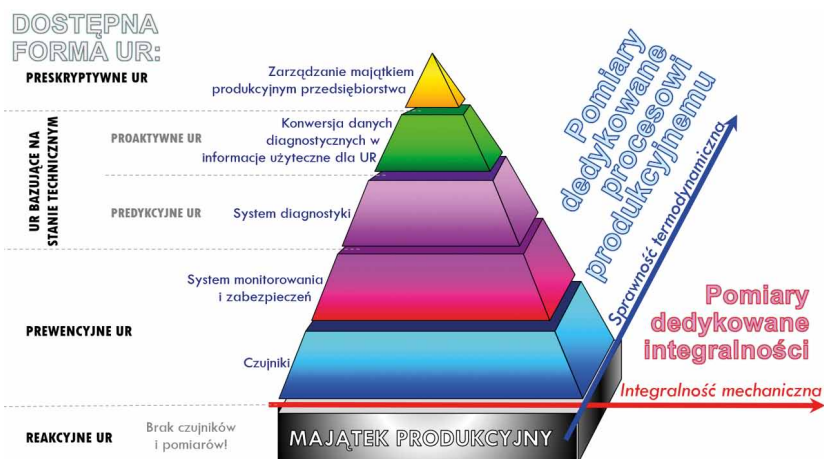
5. Zróżnicowanie utrzymania ruchu

W ciągu minionego stulecia pojawiło się wiele różnych form UR. Są one adresowane bądź do sposobu podejścia do pojedynczych maszyn, bądź też do sposobu specyfiki podejścia z UR do majątku wykorzystywanego w pewnych branżach produkcyjnych.

W kilku następnych podpunktach scharakteryzowane zostanie zróżnicowanie w podejściu do pojedynczej maszyny. Pewnym nadużyciem jest mówienie o wymienianych poniżej formach UR w odniesieniu do przedsiębiorstwa (lub instalacji produkcyjnej), chyba że charakteryzuje się przedsiębiorstwo poprzez dominującą formę nadzoru stanu technicznego wykorzystywaną dla wszystkich środków produkcji.

Natomiast w miarę upływającego czasu (tzn. w miarę postępującego rozwoju cywilizacji) pojawiają się nowe formy UR. W ramach niżej przedstawionego przeglądu taką nową formą (brak informacji o jej wykorzystywaniu w kraju) jest preskryptywne UR [1, 2].

W centralnej części rysunku 1 pokazano wymienione we wcześniejszym punkcie elementy kompleksowego systemu wspomaganie oceny stanu, a z lewej strony wymieniono różne formy UR i zaznaczono, które elementy struktury są niezbędne dla wspomaganie określonej strategii UR.



Rys. 1. Wymagane komponenty systemu wspomaganie nadzoru ST dla różnych strategii UR

Reakcyjne UR⁸

W sposób oczywisty nie wymaga stosowania jakichkolwiek technik pomiarowych, bowiem nie jest zainteresowane rozpoznawaniem zmian stanu technicznego. Działania naprawcze są reakcją na zaistniałą awarię.

Prewencyjne UR⁹

Ma zapewnić podwyższony poziom bezpieczeństwa przez wyłączenie z użytkowania bardziej kosztownego majątku produkcyjnego, gdy jest on zagrożony wystąpieniem rozległej awarii lub jego stan techniczny może zagrażać szeroko rozumianemu bezpieczeństwu procesowemu. PM wymaga zastosowania SM&Z i w konsekwencji zainstalowania na maszynie pewnego minimalnego zestawu czujników, który z punktu widzenia uszkodzeń szczególnie dla niej groźnych zabezpiecza przed wystąpieniem skutków katastroficznych.

Takimi groźnymi uszkodzeniami mogą być np.:

- uszkodzenie łożyska oporowego (bowiem zerwanie filmu olejowego i wystąpienie suchego tarcia powoduje zagrożenie nadmiernego przemieszczenia osiowego wirnika i grozi uszkodzeniem jego oraz korpusu maszyn);
- wystąpienie nadobrotów (bowiem ich nadmierny wzrost prowadzi do zniszczenia nie tylko wirnika, ale najczęściej całej maszyny, a w niektórych przypadkach skutkuje także uszkodzeniem hali, w której maszyna pracuje);
- pojawienie się wysokich poziomów drgań (bowiem skutkować one będą

przyspieszoną koncentracją naprężeń prowadzących do różnych wtórnych niebezpiecznych uszkodzeń, mogących doprowadzić w krótkim czasie do zniszczenia maszyny lub jej podzespołu).

Wyżej pozycjonowane (od już omówionych) strategii UR bazują na możliwości bardziej szczegółowej oceny stanu technicznego, która jest możliwa w konsekwencji prowadzenia bardziej zaawansowanego monitorowania, skutkującego gromadzeniem bogatszych danych o zachowaniu się podzespołów maszyny. Celem tych badań jest uzyskanie informacji o stopniu destrukcji podzespołów, umożliwiającej przygotowanie się do przeprowadzenia remontu, a w niektórych branżach także wpływu stanu technicznego na efektywność finansową realizowanego procesu produkcyjnego, bowiem stan techniczny może rzutować na pogorszenie jakości produktów i zwiększenie liczby braków. Takimi bardziej zaawansowanymi formami UR są:

Predukcyjne UR¹⁰

Umożliwia jednoznaczne rozpoznawanie określonego zbioru uszkodzeń, a więc umożliwia sformułowanie wysoce prawdopodobnej odpowiedzi na pytanie: co się wydarzy? Aby uszkodzenia były rozpoznawane prawidłowo, wymagane jest stosowanie takiego zestawu czujników oraz takich technik pomiaru i analizy, które umożliwiają ich identyfikację. Nie ma bowiem możliwości rozpoznania pewnych typów uszkodzeń z pomocą

czujników, które nie są wrażliwe na objawy charakterystyczne dla tych uszkodzeń. Tak więc większe i bardziej krytyczne agregaty wykorzystywane w procesie produkcyjnym (np. wielostopniowe turbosprężarki, ekstrudery) będą wymagały zastosowania bardziej zróżnicowanego zestawu czujników lub zastosowania ich większej liczby celem prowadzenia pewniejszej oceny stanu technicznego¹¹.

Proaktywne UR¹²

„Proaktywność” może odnosić się do takich działań służb UR, które w sytuacji pogarszającego się stanu technicznego maszyny, od działania której zależy praca większego systemu produkcyjnego, mają na celu znalezienie jakiegoś antidotum, umożliwiającego opóźnienie wstrzymania produkcji. Byłoby najlepiej, gdyby to antidotum prowadziło do polepszenia stanu technicznego krytycznego środka produkcji. Natomiast w szeregu sytuacji za sukces może być także uznane zahamowanie procesu pogarszania stanu technicznego lub choćby jego spowolnienie, co będzie prowadziło do opóźnienia w wymuszonym odstawieniu instalacji.

Przez proaktywność alternatywnie rozumie się także działania długofalowe, mające na celu wyeliminowanie najsłabszych ogniw instalacji przez ich zastąpienie ogniwami o większej niezawodności.

Tak więc z punktu widzenia środków technicznych wykorzystywanych do nadzoru stanu technicznego online PaM nie różni się od PdM, a to, co różni oba podejścia, to inwencja specjalistów UR na okoliczność ich wykorzystywania. W niektórych przypadkach dojście do bardziej jednoznacznych konkluzji umożliwiających opóźnienie wymuszonego odstawienia instalacji wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań z pomocą sprzętu przenośnego (dodatkowe czujniki w stosunku do zestawu czujników wykorzystywanych online, dodatkowe formy analizy w stosunku do dostępnych w systemie diagnostyki online etc.).

Ocena stanu technicznego w dotychczasowym tekście była dyskutowana przede wszystkim z punktu widzenia integralności mechanicznej. Ale ocena stanu technicznego w szeregu przypadków jest również bardzo ważna z punktu

widzenia sprawności termodynamicznej. Obie oceny, tzn. integralność mechaniczna i sprawność termodynamiczna mogą być dalece niezależne. Można spotkać maszyny, które np. charakteryzują się bardzo niskimi poziomami drgań (co świadczy o małym zagrożeniu dla integralności mechanicznej) oraz niską sprawnością termodynamiczną (co nie jest dobre dla procesu). I odwrotnie: można znaleźć maszyny cechujące się bardzo wysoką sprawnością termodynamiczną i posiadające bardzo zły stan techniczny ze względu na zagrożenie dynamiczne dla ich integralności mechanicznej. Tak więc z punktu widzenia realizowanego procesu produkcyjnego należy dążyć do możliwie małego zagrożenia na kierunku integralności mechanicznej oraz możliwie najwyższej sprawności termodynamicznej. Dla maszyn, dla których sprawność termodynamiczna współdecyduje o wyniku finansowym przedsiębiorstwa, należy również brać pod uwagę wykorzystywanie UR bazującego na sprawności termodynamicznej.

UR bazujące na sprawności termodynamicznej¹³

Takie UR jest możliwe i wskazane dla tych wszystkich procesów produkcyjnych, które wykorzystują przemiany termodynamiczne. W niektórych sytuacjach ww. oceny mogą pozostawać w ujemnym skorelowaniu. I tak dla przykładu powiększenie luzów mechanicznych (np. uszczelnienia wału turbiny, luz między wirnikiem pompy a obudową) prowadzi do przecieków medium i w konsekwencji do pogorszenia położenia punktu pracy na charakterystyce. Obniżenie sprawności termodynamicznej maszyny może prowadzić do osłabienia oddziaływań dynamicznych między jej podzespołami (niższe poziomy drgań, wolniejsza kumulacja naprężeń), co jest równoznaczne z obniżeniem zagrożeń na kierunku integralności mechanicznej ze strony dynamiki maszyny.

Pojawienie się koncepcji Przemysłu 4.0 dało dodatkowy impuls w procesie doskonalenia analiz biznesowych, w tym także analityk wykorzystywanych w UR. W analizach zaczyna się uwzględniać analitykę preskryptywną (która wychodzi poza wcześniej wykorzystywane: opisową i predykcyjną) – rys. 2, w którego

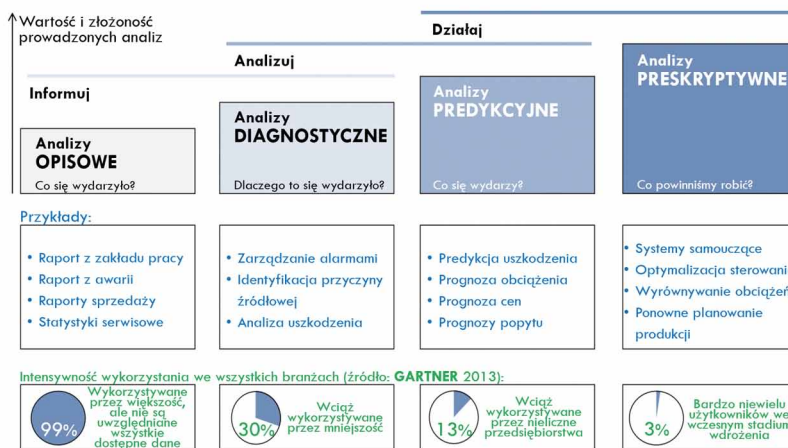
fragmentcie o zróżnicowanej kolorystyce podano przykłady różnego rodzaju analiz prowadzonych w przedsiębiorstwach.

Możliwość gromadzenia w jednym miejscu różnych danych dotyczących tego samego systemu produkcyjnego stwarza stosunkowo łatwą możliwość wykorzystania tych danych do różnych zadań, w tym także dla tych stojących przed służbami UR. W zależności od dojrzałości personelu służb UR wykorzystuje on analityki o różnym stopniu zaawansowania. Czym wyższy jest poziom dojrzałości tego personelu, tym swobodniej wykorzystuje on bardziej zaawansowane narzędzia, także takie, które minimalizują udział człowieka w konwersji danych w informacje umożliwiające wstępne wypracowanie najbardziej poprawnych decyzji i wtórnie prowadzących do najbardziej uzasadnionych akcji. Na rys. 3 pokazano minimalizację roli człowieka w procesie formułowania decyzji w zależności od stopnia zaawansowania wykorzystywanych analiz.

Analityki wykorzystywane w predykcyjnym UR zostały rozszerzone o możliwość analizowania różnych scenariuszy rozwoju sytuacji w następstwie podjęcia różnych hipotetycznych decyzji, a następnie uzupełnione o możliwość estymacji różnych skutków tych decyzji – w tym także efektów finansowych rzutujących na wynik finansowy przedsiębiorstwa. W ten sposób predykcyjne UR może być zastąpione doskonalszym, jakim jest:

Preskryptywne UR¹⁴

Pojęcie preskryptywnego UR pojawiło się mniej więcej w tym samym czasie, co Internet Rzeczy¹⁵ i jest bardziej zaawansowaną formą PdM. W ramach Internetu Rzeczy gromadzone są i przechowywane liczne dane, z których znaczna część nie była wcześniej wykorzystywana przez UR. Współcześnie te dodatkowe dane mogą wpływać pozytywnie na predykcję stanu oraz w konsekwencji na finalnie podejmowane decyzje i ich rezultaty. O ile w przypadku PdM staramy się znaleźć odpowiedzi na pytania w rodzaju: (1) co się może stać? (2) kiedy do tego może dojść? (3) jaka jest przyczyna, z powodu której dochodzi do czegoś tam?, o tyle w przypadku PsM staramy



Rys. 2. Zróżnicowanie analiz prowadzonych w przedsiębiorstwach



Rys. 3. Zróżnicowanie zaangażowania człowieka w proces decyzyjny w zależności od zaawansowania wykorzystywanych narzędzi analitycznych

się jeszcze dodatkowo oszacować korzyści, jakie możemy osiągnąć, oraz ryzyka, które ponosimy w konsekwencji podjęcia takiej lub innej decyzji, a także zdefiniować efekty jej skutków wtórnych: jak wprowadzenie w życie czegoś tam będzie wpływać na wszystko pozostałe.

Na rys. 4 pokazano, w której części analizy preskryptywnej zawiera się analiza predykcyjna.

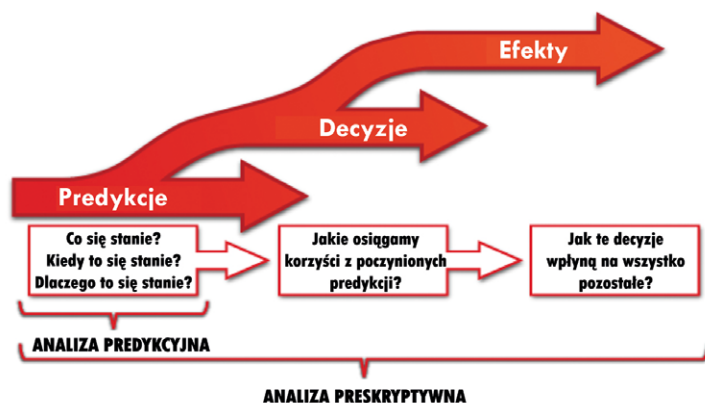
Pokazana na rys. 3 struktura wskazuje na coraz mniejszy udział człowieka w procesie podejmowania decyzji na rzecz prowadzonej działalności (np. proces produkcyjny, utrzymanie w ruchu majątku produkcyjnego, ...). Pośrednio świadczy ona także o coraz większej doskonałości systemów wspomagających proces analizy, w tym także opartych na sztucznej inteligencji, które są wykorzystywane w procesie formułowania decyzji.

Fakt minimalizowania udziału, a finalnie eliminowania człowieka

z procesu formowania decyzji powoduje, że decyzje te posiadają charakter dyrektywny (nakazowy). W związku z tym, że słowo „preskryptywny” jest mało popularne w kręgach inżynierskich związanych z UR, być może lepiej byłoby pojawiający się nieśmiało w krajowym piśmiennictwie technicznym termin „preskryptywne UR” [4] zastąpić przez „dyrektywne UR” lub „nakazowe UR”.

W dolnej części rys. 2 podano dla wszystkich branż przemysłowych oszacowanie intensywności wykorzystywania różnego typu analiz. Wynika z niego, że na początku drugiej dekady bieżącego wieku analizy predykcyjne wykorzystywane były w około co ósmym przedsiębiorstwie, natomiast podejście preskryptywne jedynie w 3% przedsiębiorstw.

Więcej o ewolucji i specyfice strategii UR można znaleźć w [5, 6]. Natomiast w kolejnym punkcie zajmiemy się



reklama

Rys. 4. Analiza predykcyjna jako część analizy preskryptywnej

wpływem strategii UR oraz ponoszonymi na jej egzekwowanie kosztami na gotowość linii produkcyjnej do realizacji stawianych przed nią celów.

6. Rewolucje przemysłowe a UR

Wpływ rewolucji przemysłowych na sposób prowadzenia produkcji oraz na sposób UR majątku produkcyjnego scharakteryzowany został w dwóch tabelach 1 i 2.

Kolejne strategie UR, wyspecyfikowane w ostatniej kolumnie tabeli 2, pojawiały się w takim czasie, jak opisany w kolumnie drugiej. Nie oznacza to jednak, że strategie wcześniej wykorzystywane były zastępowane przez te nowe. Wciąż w przedsiębiorstwach znajduje się znaczna część majątku produkcyjnego, dla którego te historycznie wcześniej wdrożone strategie są całkowicie wystarczające i w konsekwencji najlepsze. Podejście do UR zmienia się wraz ze zmianą kształtu systemu produkcyjnego. O ile nikogo pewnie nie dziwi podejście RtF dla maszyny o małym znaczeniu dla systemu produkcyjnego, to RtF dla jakiegoś większego systemu produkcyjnego będzie już budziło naturalny sprzeciw. I podobnie: o ile PsM nie budzi zdziwienia w przypadku jego zastosowania dla dużego systemu produkcyjnego, o tyle jego próba aplikacji dla pojedynczego środka produkcji, nawet wtedy, gdyby był to agregat krytyczny, może już budzić wątpliwości, bowiem w przypadku pojedynczego agregatu nie bardzo jest miejsce na zadawanie pytania „jak podjęte decyzje wpłyną na wszystko pozostałe”, bo to „wszystko pozostałe” w ograniczeniu „dla pojedynczego agregatu” po prostu nie istnieje.

7. Społeczeństwo informacyjne

W roku 1963 japoński etnolog Tadao Umehao wprowadził pojęcie społeczeństwo informacyjne (jap. *johoka shakai*).

Definicja społeczeństwa informacyjnego, która najczęściej jest wykorzystywana w Europie, została sformułowana w [7]. Zgodnie z tym raportem, „społeczeństwo informacyjne charakteryzuje się przygotowaniem i zdolnością do użytkowania systemów informatycznych i wykorzystuje usługi telekomunikacyjne do przekazywania i zdalnego przetwarzania informacji”.

Na potrzeby strategii określającej rozwój społeczeństwa informacyjnego w Polsce do roku 2013 społeczeństwo informacyjne zdefiniowano jako to, „w którym przetwarzanie informacji z wykorzystaniem technologii informacyjnych i komunikacyjnych stanowi znaczącą wartość ekonomiczną, społeczną i kulturową”. Rozwinięte społeczeństwo informacyjne to takie, które korzysta ze wspólnej przestrzeni informacyjnej, w jego ramach możliwe jest korzystanie z usług administracji publicznej, które są w pełni dostępne online, w kontekście wykorzystania technologii informacyjnych i komunikacyjnych uwzględnia kwestie integracji społecznej (poprzez minimalizację wykluczenia cyfrowego), inwestuje w działalność badawczo-rozwojową i charakteryzuje się wysokim poziomem innowacyjności.

O stopniu rozwoju społeczeństwa świadczy także jego podejście innowacyjne do wdrażania technologii informacyjno-komunikacyjnych nie tylko w ramach realizowanych usług zdrowotnych czy społecznych, ale także w realizowanym procesie produkcyjnym tak

reklama

w zakresie wykonywanych produktów (np. z myślą o lepszej funkcjonalności produktów na kierunku ich cech podstawowych, jak również na kierunku realizowanej autodiagnostyki itp.), jak również na rzecz wspomagania realizowanego procesu produkcyjnego – w tym także UR.

8. Kroki w kierunku Przemysłu 4.0

8.1. Zarządzanie produkcją

- Logistyka bez dokumentów papierowych.
- Możliwość śledzenia przemieszczania się produktów i części (w tym informacje w czasie rzeczywistym o stanach magazynowych i ich prognozowanych zmianach).
- Czytniki RFID.
- Pamięć cyfrowa produktu.
- Optymalizacja produkcji dzięki zastosowaniu Big Data.

8.2. Rozwój technik wspomagających UR

- UR realizowane na odległość.
- Okulary informacyjne, komputerowe wsparcie dla podejmowania decyzji.
- Ekstensywne wykorzystanie czujników do monitorowania stanu urządzeń produkcyjnych – w tym także przesyłanie danych z sensorów bezprzewodowych bezpośrednio do Internetu. Intensyfikacja wykorzystania systemów analizy diagnostycznej prowadząca do znacznego zwiększenia liczby miar sygnałów (np. dla sygnałów dynamicznych w konsekwencji realizowania pomiarów dla wielu różnych pasm częstotliwościowych).

8.3. Tematyka stowarzyszona

Coraz większa intensyfikacja wdrażania technik cyfrowych w proces produkcyjny oraz zwiększanie wykorzystywania czujników będących źródłami nie tylko danych statycznych, ale również dynamicznych, prowadzi do gromadzenia coraz większych zbiorów danych. W konsekwencji problematyka dotycząca Big Data zyskuje w działaniu przedsiębiorstwa coraz bardziej strategiczne znaczenie, bowiem konwencjonalne technologie nie są już w stanie zaspokajać potrzeb związanych z ich przetwarzaniem. Jedynie superkomputerowe systemy klasy

Tabela 1. Charakterystyka rewolucji przemysłowych

Nr	UMOWNY POCZĄTEK	NAZWA	CHARAKTERYSTYKA
I	Koniec XVIII wieku	MECHANIZACJA	Produkcja mechaniczna wspomagana siłą pary i wody z pomocą POJEDYNCZYCH MASZYN
II	Początek XX wieku	ELEKTRYFIKACJA	Produkcja masowa z zastosowaniem energii elektrycznej • Karty perforowane do zapisu DANYCH • Zastosowanie LINII PRODUKCYJNYCH
III	Lata 70-e XX wieku	CYFRYZACJA - WIEK KOMPUTERÓW	Automatyzacja produkcji przemysłowej przy wykorzystaniu TIK • Mikrokontrolery stosowane do sterowania maszynami • Intensyfikacja zautomatyzowania procesów produkcyjnych • Systemu IT do PLANOWANIA I STEROWANIA produkcją
IV	Druka dekada XXI wieku	ZANIKANIE BARIER MIĘDZY LUDŹMI I MASZYNAMI	i. Pionowe i poziome łączenie środków produkcji i systemów obsługujących w sieci z wykorzystaniem standardów Internetowych; ii. Identyfikowalne i komunikowalne obiekty; iii. Samodoskonalące się obiekty; iv. Internet ludzi (sieci społecznościowe i biznesowe) v. Internet rzeczy (inteligentna mobilność) vi. Internet usług (inteligentne sieci i logistyka) vii. Internet danych (inteligentne budynki i mieszkania)

Tabela 2. Wpływ rewolucji przemysłowych na utrzymanie ruchu

Nr	UMOWNY POCZĄTEK	NAZWA	PRZYCZYNNY DO ULEPSZENIA UR	STRATEGIA UTRZYMANIA RUCHU
I	Koniec XVIII wieku	MECHANIZACJA	Rozpoznawanie zmian stanu technicznego drogą ORGANOLEPTYCZNA	REAKCYJNE UR
II	Początek XX wieku	ELEKTRYFIKACJA	Lata 30-e XX w: wdrożenie czujników wspomagających ocenę stanu technicznego	Początki wdrażania PREWENCYJNEGO I PREDYKCYJNEGO UR
			Lata 50-e i 60-e XX w: wdrożenie systemów monitorowania i zabezpieczeń stanu technicznego maszyn	Upowszechnianie PREWENCYJNEGO UR
III	Lata 70-e XX wieku	CYFRYZACJA (WIEK KOMPUTERÓW)	Wdrażanie skomputeryzowanych systemów akwizycji danych i przetwarzania sygnałów	Zapoczątkowanie UR bazującego na STANIE TECHNICZNYM ... w tym m.in. PREDYKCYJNE UR
			Lata 90-e XX w: Wdrożenie sztucznej inteligencji → systemy ekspertowe wspomagające konwersję DANE → INFORMACJE UŻYTECZNE DLA UR	UR bazujące na STANIE TECHNICZNYM ... w tym m.in. PROAKTYWNE UR i zapoczątkowanie UR BAZUJĄCEGO NA SPRAWNOŚCI TERMODYNAMICZNEJ
IV	Druka dekada XXI wieku	ZANIKANIE BARIER MIĘDZY LUDŹMI I MASZYNAMI	i. Zwiększanie różnicowania czujników wykorzystywanych do oceny ST ii. Zwiększanie liczby czujników wykorzystywanych do oceny ST iii. Postępująca optymalizacja technik konwersji DANYCH w INFORMACJE UŻYTECZNE DLA SŁUŻB UR iv. wzrost zaawansowania technik wykorzystywanych do analiz On-Line v. Wdrażanie systemów rozpoznawania anomalii (dla UR oraz dla PROCESU PRODUKCYJNEGO)	PRESKRYPTYWNE UR

HPC (*High-Performance Computing*) mają odpowiednią moc, skalę i szybkość działania, żeby uczynić z Big Data fundament krytycznych procesów biznesowych i strategicznego podejmowania decyzji – w tym także dla UR.

Big Data od dawna obiecują więcej niż w rzeczywistości są w stanie obecnie zaoferować większości przedsiębiorców. Mimo wszelkich nadziei płynących z wdrożeń na poziomie chmury, w dalszym ciągu o technologiach Big Data częściej się mówi, niż faktycznie je realizuje. Jak wynika z danych Gartnera, dotychczas zaledwie 14% firm wdrożyło platformę Hadoop¹⁶, podstawę dla analizy zbiorów rozległych.

Natomiast raz po raz, przy okazji tematyki Big Data, pojawia się pojęcie Smart Data. Smart Data są podzbiorem/podzbiórami Big Data, które wydają się charakteryzować w wystarczającym

stopniu jakiś zaistniały problem i w konsekwencji mogą szybciej doprowadzić do jego rozwiązania.

Wykorzystywanie Smart Data jest celowe również w takich sytuacjach, w których jakiś znaczący problem można podzielić na kilka mniejszych i w konsekwencji, posługując się inteligentnie wybranymi podzbiórami danych ze zbioru Big Data, doprowadzić do rozwiązań częstkowych¹⁷.

Big Data są często opisywane z punktu widzenia następujących pięciu charakterystyk: objętość (danych), prędkość (gromadzenia danych), prawdziwość (danych), różnicowanie (danych) i istotność (danych dla problemu). Jeśli którakolwiek z tych charakterystyk gromadzonych przez użytkownika Big Data zacznie przytłaczać czynione próby kontrolowania problemu, oznacza to, że Big Data towarzyszy... duży problem z Big Data.

9. Internet Rzeczy – IoT

W raporcie [8] oceniono, że o ile rok 2016 można było nazwać „rokiem dojrzenia Internetu Rzeczy”, o tyle w 2017 r. „Internet Rzeczy stanie się niezbędnym elementem nowoczesnego biznesu”.

Jednym z dominujących obszarów zastosowań IoT, generującym największą wartość, są wg Instytutu McKinsey aplikacje w fabrykach wspomagające UR w zakresie prognozy czasu przeprowadzania niezbędnych napraw oraz obsługi i urządzeń oraz ewidencjonowania zasobów (np. magazynowych w zakresie części zamiennych niezbędnych do przeprowadzenia remontów).

Pięć lat temu firma GE zdecydowała się zacząć twórczo działać w obszarze IoT¹⁸. W konsekwencji od 2011 roku zatrudniono 1200 specjalistów oraz zainwestowano ponad miliard dolarów, aby osiągnąć taki poziom rozwoju, jaki firma prezentuje dzisiaj. Obecnie GE zatrudnia kilka tysięcy deweloperów, którzy

pomagają tworzyć rozwiązania cyfrowe. Przykładowo, jednym z obszarów, na rzecz którego prowadzono prace, był obszar generowania energii z pomocą turbin wiatrowych¹⁹. Rezultatem zastosowania szeregu dodatkowych czujników jest poprawa wydajności pracy turbin wiatrowych o ~5%. Kilka procent może się wydawać konsumentom dość marnym wynikiem, jednak w rzeczywistości ma to duży wpływ na wytwarzanie energii. Zauważmy, że tych 5% w skali świata to na dziś w przybliżeniu tyle, ile wynosi moc (ciepłych) elektrowni zawodowych zainstalowanych w Polsce.

10. Różnicowanie sieci lokalnych dla nadzoru stanu

Lokalne sieci komunikacyjne, nazywane również sieciami LAN (*Local Area Networks*), to sieci, które posiadają ograniczony zasięg oraz ograniczone możliwości w zakresie liczby podłączanych do nich urządzeń sieciowych. Wprowadzana pierwotnie w przedsiębiorstwach

infrastruktura sieciowa wykorzystywana była do różnych zadań (technologia, zadania biznesowe etc.). Działanie sieci lokalnej mogło ograniczać się np. do urządzenia lub do grupy urządzeń, procesu technologicznego, do jednego lub kilku budynków.

Takie sieci budowane są bezpośrednio przez użytkownika, a więc cechują się bardzo dużą różnorodnością. Ze względu na ograniczony obszar działania cechują się również stosunkowo wysokim poziomem bezpieczeństwa działania (choć zdarzało się jeszcze w latach 90. XX w., że gry, uruchamiane na wielozadaniowych serwerach akwizycji danych przez załogę przedsiębiorstwa, były zawirusowane i prowadziły do naruszenia poprawności działania oprogramowania dedykowanego UR).

W [9] opisano elementy struktury wspólnego systemu nadzoru stanu technicznego. Dwa z nich to system monitorowania i zabezpieczeń oraz system akwizycji danych diagnostycznych.

Dla każdego z nich możliwe jest zbudowanie sieci lokalnej.

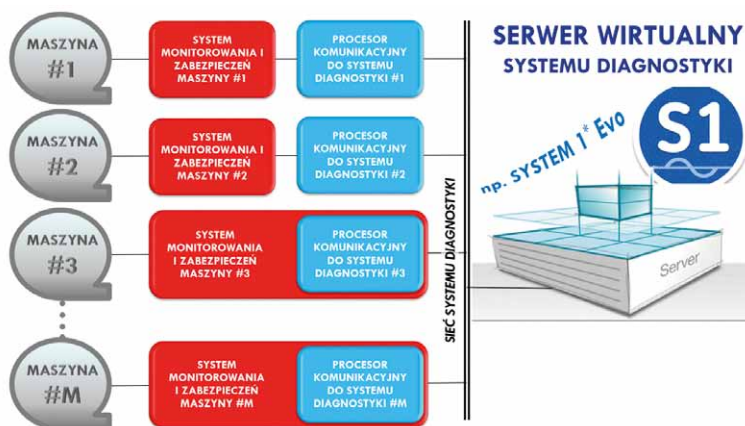
11. Struktura sieci diagnostycznych dla maszyn krytycznych

Współcześnie można przyjąć, że struktura sieci LAN wykorzystywanej do wspomagania oceny stanu technicznego maszyn krytycznych odpowiada tej, którą pokazano na rys. 5.

W Polsce pierwsze lokalne sieci diagnostyczne zostały wdrożone w energetyce dla nadzoru stanu technicznego turbogeneratorów. Prekursorami w tym zakresie były Elektrownia Rybnik oraz Elektrociepłownia Siekierki. Pierwsze sieci typu LAN zainstalowano w nich w latach 1992–1993.

Takie sieci instalowano w dużych przedsiębiorstwach posiadających kilka instalacji produkcyjnych, w pierwszej kolejności do wspomagania nadzoru najbardziej krytycznych maszyn. Natomiast w krajach wysoko rozwiniętych serwery akwizycji danych były uruchamiane nie na poziomie przedsiębiorstwa, a na poziomie pojedynczej jednostki produkcyjnej i wspomagały nadzór nie tylko maszyn najważniejszych w tej jednostce, ale także maszyn ogólnego przeznaczenia. Pod pojęciem „jednostka produkcyjna” należy rozumieć np. instalację produkcyjną w przedsiębiorstwie chemicznym, pojedynczy blok energetyczny w elektrowni czy pojedynczą linię z maszyną papierniczą i innym majątkiem wspomagającym jej pracę.

Nie w każdym przypadku rozwój awarii mniej krytycznej maszyny, prowadzący do jej unieruchomienia, następuje w krótkim czasie, a także nie w każdym przypadku diagnostyka jej stanu technicznego wymaga współfazowej akwizycji danych diagnostycznych. Taka sytuacja ma np. miejsce w przypadku maszyn łożyskowych tocznie, a więc agregatów o mocach napędów na ogół mniejszych niż w przypadku maszyn krytycznych łożyskowych ślizgowo i w konsekwencji niebędących tak krytycznymi dla pracy przedsiębiorstwa. O ile w przypadku maszyn łożyskowych ślizgowo rozwój awarii prowadzącej do zniszczenia łożyska może trwać kilka sekund, o tyle w przypadku maszyn łożyskowych tocznie postępujący



Rys. 5. Struktura lokalnej sieci diagnostycznej wspomagającej nadzór stanu technicznego

proces uszkodzania rozwija się na ogół tygodniami, a nawet miesiącami. Współcześnie nie ma większych problemów natury technicznej związanych z takim poprawnym oprzyrządowaniem maszyn łożyskowych tocznie, aby skutecznie wychwycić pogarszanie się stanu technicznego na długo przed wystąpieniem większości awarii.

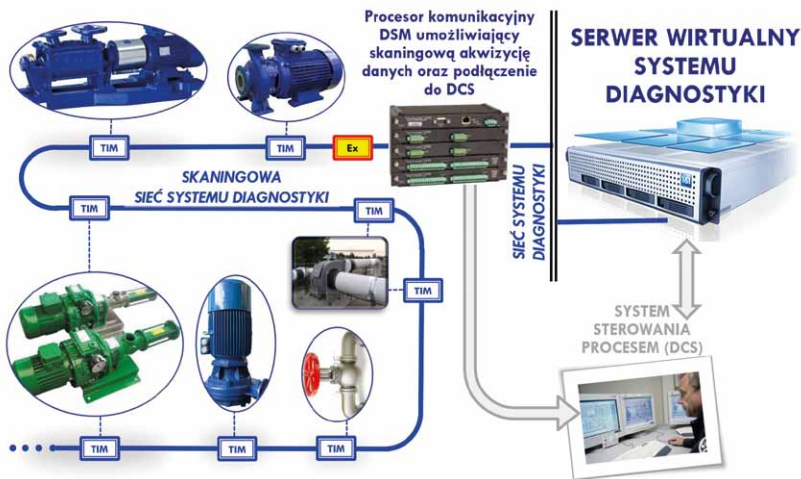
Dla potrzeb wspomagania diagnostyki maszyn mniejszej ważności opracowane zostały już na przełomie lat 80./90. systemy skanujące, które także posiadają strukturę sieciową. Jednym z pierwszych takich systemów dostępnych na rynku był system TRENDMASTER, który został zaimplementowany także w kilku przedsiębiorstwach w Polsce.

Pierwszą interesującą cechą tego systemu jest fakt, że czujniki wykorzystywane do akwizycji sygnałów diagnostycznych były zasilane z serwera akwizycji danych tylko w tych chwilach, w których transmisja sygnału była z ich pomocą realizowana. Rozwiązanie takie wymusza stosowanie specyficznego czteroprzewodowego kabla systemowego, w którym jedna para przewodów służy indywidualnemu zasilaniu czujników, a druga jest wykorzystywana do transmisji sygnału z czujnika do skaningowego procesora komunikacyjnego. Rozwiązanie takie umożliwia podłączenie do pojedynczego kabla systemowego nawet kilkuset różnego typu czujników, a procesor komunikacyjny umożliwia na ogół podłączenie więcej niż tylko jednego kabla systemowego. W przypadku systemu TRENDMASTER czujniki są podłączane do kabla systemowego poprzez moduły interfejsowe zwane TIM-ami²⁰,

które oprócz zadania zasilania czujnika oraz transmisji sygnału umożliwiają także identyfikację czujnika w sieci, a kable systemowe są podłączone do procesora komunikacyjnego DSM. Procesor DSM umożliwia podłączenie do 8 kabli systemowych.

Drugą interesującą cechą systemu jest możliwość jego wykorzystywania w strefach Ex, bowiem dzięki zastosowaniu jedynie dwóch barier dla każdego kabla systemowego (zlokalizowanych poza strefą Ex – co na rys. 6 zostało pokazane z pomocą prostokąta z opisem „Ex”) można bezpiecznie realizować pomiary z kilkudziesięciu czujników powiązanych z pojedynczym kablem systemowym i znajdujących się już w strefie niebezpiecznej.

Na rys. 6 pokazano przykładową topologię takiego systemu. Pokazany tu serwer akwizycji danych diagnostycznych może być tym samym serwerem, który jest pokazany na rys. 5. Dwie strzałki pokazują dodatkowe możliwe połączenia między systemem sterowania procesem a skaningowym procesorem komunikacyjnym DSM oraz serwerem systemu diagnostyki. Połączenie procesora z DCS-em umożliwia przekazywanie do operatorów danych o bieżących wartościach pomiarów, a także umożliwia działanie DCS jako systemu zabezpieczenia nie tylko z powodu przekroczenia wartości granicznych po stronie procesu, ale także jego skonfigurowanie dla zabezpieczenia maszyn na okoliczność zagrożenia jej integralności mechanicznej. Między serwerem systemu diagnostyki i DCS-em zawsze winno mieć także miejsce interfejsowanie. Umożliwia ono import do



Rys. 6. Struktura skaningowego systemu diagnostyki w wersji przewodowej

systemu diagnostyki danych o bieżących parametrach procesowych i środowiskowych, co przyczynia się do zwiększenia efektywności działania systemu diagnostyki [10], umożliwia synchronizację czasu w urządzeniach cyfrowych sieci LAN, a także może być wykorzystywane

na okoliczność wielu innych zadań tak po stronie realizacji procesu produkcyjnego, jak i po stronie UR.

Omówiony przykład systemu skaningowego jest systemem klasy przewodowej. Natomiast coraz częściej i szerzej wykorzystywane są również

bezprzewodowe systemy skaningowe. Przykład implementacji czujników bezprzewodowych dedykowanych pomiarom ukierunkowanym na nadzór stanu technicznego omówiono w dalszej części artykułu.

12. Lokalne sieci komunikacyjne na przykładzie aplikacji w energetyce

W przypadku energetyki do diagnostycznych sieci LAN historycznie w pierwszej kolejności były podłączane turbozespoły. W przypadku ww. Elektrowni SIEKIERKI, użytkującej mniejsze maszyny niż Elektrownia Rybnik, do włączenia do systemu diagnostyki wszystkich turbozespołów wystarczyło zbudowanie pojedynczej sieci lokalnej, obsługiwanej przez pojedynczy serwer. W przypadku większych turbozespołów Elektrowni Rybnik, w której każdy turbozespół był nadzorowany z pomocą dwóch kaset systemu monitorowania i zabezpieczeń, łączna

reklama

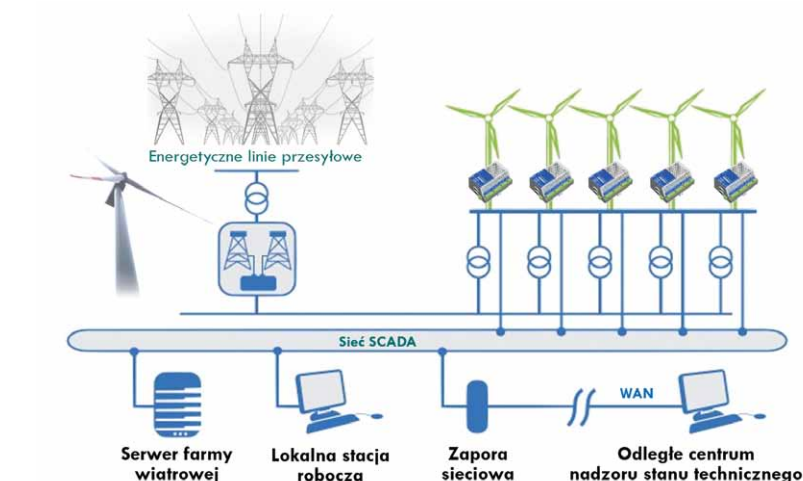
reklama

liczba procesorów komunikacyjnych wynosiła 16 i wykraczała poza możliwości ich podłączenia do pojedynczej sieci lokalnej (zastosowany wtedy system diagnostyki dopuszczał włączenie do niej maksymalnie 12 procesorów komunikacyjnych). W konsekwencji w elektrowni zorganizowane zostały dwie sieci lokalne, z których każda obsługiwała 4 turboszespoły, a więc miała podłączonych 8 procesorów komunikacyjnych z funkcjonalnością transjentową (tzn. umożliwiającą gromadzenie danych w stanach przejściowych).

Współcześnie, w przypadku większych bloków energetycznych, do systemu włączane są już nie tylko turboszespoły, ale także inne maszyny wirnikowe i tłokowe, jak pompy, wentylatory, dmuchawy, sprężarki, a także inny majątek produkcyjny, jak np. transformatory. Tak więc dobrą praktyką jest ograniczenie terytorialnego działania takiej sieci lokalnej do jednego lub ewentualnie dwóch bloków.

Do podłączenia procesorów komunikacyjnych oraz serwera systemu diagnostyki może być wykorzystywana także sieć technologiczna. Mimo tego, że rozwiązanie takie zostało z powodzeniem zastosowane w jednej krajowej elektrowni, nie jest to rozwiązanie technicznie do końca poprawne i w konsekwencji promowane. Brak kontroli nad bieżącym obciążeniem sieci wynikającym z realizacji zadań innych niż diagnostyczne, oraz w konsekwencji możliwość przeciążenia sieci i zakłócenia stabilności jej działania skłaniają do budowania sieci dedykowanych wyłącznie realizacji zadania diagnostycznego i to w taki sposób, aby sieć dawała gwarancję ciągłej stabilności pracy.

W tych samych latach, kiedy w Polsce do systemu diagnostyki zaczęto włączać maszyny najbardziej krytyczne, w krajach wyżej rozwiniętych oraz będących lepiej przygotowanymi do realizacji UR bazującego na stanie technicznym takie diagnostyczne sieci LAN były organizowane nie na poziomie elektrowni, ale na poziomie pojedynczego bloku energetycznego, a do systemu diagnostyki były włączane nie tylko turbogeneratory, ale także pracujące na tym bloku pompy, wentylatory, transformatory. W Polsce taka konstrukcja sieci lokalnej miała miejsce po raz pierwszy w bardzo ograniczonym zakre-



Rys. 7. Topologia sieci LAN wykorzystywanej na farmie wiatrowej z pokazanymi elementami służącymi do nadzoru drganiowego maszynowni

sie w roku 1994 dla bloku #11 Elektrowni Bełchatów, gdzie oprócz turboszespołu do sieci diagnostyki zostały także włączone turbo- i elektropompa wody zasilającej. Pierwszy w kraju nowy blok energetyczny wyposażony z inicjatywy inwestora w zunifikowane systemy monitorowania i zabezpieczeń, które zostały włączone do diagnostycznej sieci typu LAN, został uruchomiony w Elektrociepłowni DĄBRÓWKA w Katowicach pięć lat później. Współcześnie dąży się do wyposażania nowo budowanych bloków w standaryzowane rozwiązania nadzoru stanu technicznego, łącznie z diagnostycznymi sieciami LAN. W taki sposób zostały zorganizowane sieci diagnostyczne dla wybranych maszyn wirnikowych dla bloków energetycznych 858 MW w Bełchatowie oraz 1075 MW w Kozienicach. Niestety, w przypadku wszystkich nowo uruchomionych w tym wieku bloków SIWZ-y w zakresie wymagań dotyczących systemu nadzoru stanu technicznego cechują się znaczną liczbą nie tylko niedociągnięć, ale także błędów. Żaden z nich nie zawierał także wytycznych dla sieci komunikacyjnych wykorzystywanych dla nadzoru stanu technicznego ani na rzecz zapewnienia właściwego bezpieczeństwa cybernetycznego dla SM&Z oraz dla systemu diagnostyki.

Opisana wyżej sytuacja, z bardzo słabymi zapisami w SIWZ-ach na kierunku systemów mających zabezpieczać najważniejszy majątek produkcyjny oraz wspomagać UR, w żadnym stopniu nie uległa poprawie dla kilku bloków w kraju „w budowie”.

Bardzo podobną strukturę, do tej która jest wykorzystywana w elektrowniach węglowych, mają systemy nadzoru stosowane w innych obszarach energetyki, jak np. w energetyce wiatrowej. Systemy monitorowania i zabezpieczeń są dostosowane do rozwiązania konstrukcyjnego maszynowni zlokalizowanej w gondoli. Przykładem takiego systemu jest ADAPT.WIND. Gromadzone przez system pomiary są przekazywane poprzez lokalną sieć SCADA do serwera nadzoru stanu technicznego, tak jak jest to pokazane na rys. 7.

Bieżąca ocena dostępna jest na lokalnej stacji roboczej (serwer farmy wiatrowej), która daje szybki przegląd stanu poszczególnych turbin oraz umożliwia wgląd w szczegółowe pomiary zgromadzone dla wybranej turbiny. Na rys. 8 pokazano przykładowy ekran systemu nadzorującego majątek produkcyjny farmy. System umożliwia natychmiastową informację o stanie technicznym wszystkich maszyn, a także zapewnia szybki dostęp do danych pomiarowych gromadzonych dla każdej z nich.

Te same dane są dostępne w odległym centrum nadzoru stanu technicznego (np. na poziomie grupy energetycznej), które nadzoruje stan techniczny turbin wiatrowych pracujących w kilku farmach.

13. Sieci diagnostyczne o ograniczonej funkcjonalności

Pierwsze systemy monitorowania i zabezpieczenia stanu technicznego wdrażane od przełomu lat 50./60., które wykorzystywały czujniki drgań, praco-



Rys. 8. Przykład ekranu systemu nadzoru stanu technicznego farmy wiatrowej dla systemu wykorzystującego monitory ADAPT

wały dość podobnie do pomiarów realizowanych w systemie DCS dla sygnałów quasi-statycznych, tzn. dla sygnału z jednego czujnika w systemie był na ogół realizowany pojedynczy pomiar. Przejście z analogowych systemów monitorowania i zabezpieczeń do systemów cyfrowych²¹ otworzyło nowe możliwości w zakresie lep-

można było pokusić się o zarządzanie stanem technicznym monitorowanego majątku lepszym niż sterowanie zabezpieczeniami. W niektórych przypadkach rozwiązywanie problemów ruchowych możliwe było w oparciu o dostępne w systemie monitorowania pomiary diagnostyczne.

szego skonfigurowania systemu, a także wypracowywania przez niego dodatkowych miar, stwarzających w konsekwencji możliwość lepszego zarządzania stanem technicznym maszyny. Oznacza to, że już wtedy, posiadając taki natenczas nowoczesny system monitorowania i zabezpieczeń (wciąż bez specjalizowanej nadbudowy diagnostycznej),

Nowe konstrukcje wielokanałowych systemów monitorowania i zabezpieczeń systematycznie zwiększają liczbę wypracowywanych estymat sygnałów drgań. I tak o ile wdrażana w roku 1996 pierwsza generacja SYSTEMU 3500 umożliwia generowanie do 8 estymat liczbowych dla sygnałów dynamicznych, o tyle już pojawiające się w bieżącej dekadzie różne warianty SYSTEMU 3701 (system ADAPT) zapewniają generowanie dla takich sygnałów nawet do 20 specjalizowanych pomiarów, co umożliwi użytkownikom różnych maszyn pierwszoplanowe stosowanie takich estymat sygnałów, które są najbardziej przydatne dla UR.

Systemy monitorowania posiadają na ogół link cyfrowy umożliwiający ich interfejsowanie z systemami klasy DCS, natomiast rzadko link ten jest wykorzystywany do transmisji specjalizowanych estymat sygnału, bowiem oprogramowanie DCS nie jest przygotowane do prezentacji nietypowych i na

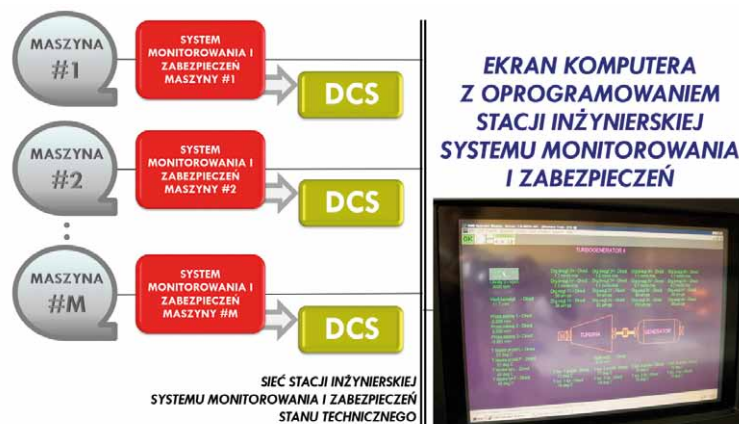
ogół niezrozumiałych dla operatorów pomiarów (np. wybrane wektory drgań), które są (lepiej: winny być) zrozumiałe i przydatne dla specjalistów z UR. Rozwiązaniem oferowanym przez producentów systemów monitorowania jest stacja inżynierska stanowiąca dodatek do tego SM&Z. Jej wykorzystywanie ma na ogół sens w przypadku posiadania grupy maszyn nadzorowanych z pomocą systemów monitorowania tego samego typu. Taka stacja inżynierska nie tylko umożliwia łatwe konfigurowanie i rekonfigurowanie systemu monitorowania, ale także gwarantuje dostęp do wszystkich pomiarów realizowanych przez system monitorowania specjalistom ds. maszyn oraz zapewnia specjalistom odpowiedzialnym za zabezpieczenia lepsze zarządzanie tymi zabezpieczeniami.

Na rys. 9 pokazano taką stację inżynierską, która pracuje na bazie sieci typu LAN i bywa wykorzystywana dla SM&Z SYSTEM 3500.

Na zakończenie tego punktu warto zdefiniować granicę między siecią diagnostyczną o ograniczonej funkcjonalności a sieciami diagnostycznymi, dla których określenie „ograniczone” nie jest zasadne. Można przyjąć, że granica ta jest uzależniona od rodzaju danych dostępnych w systemie. Z ograniczonymi systemami diagnostyki mamy do czynienia wtedy, kiedy system diagnostyki udostępnia jedynie miary liczbowe i nie udostępnia analiz funkcyjnych. O pewnej ograniczoności można również mówić wtedy, kiedy system diagnostyki nie posiada zdolności gromadzenia i prezentacji danych dla procesów transjentowych i wspomaga jedynie analizy w ustalonych warunkach pracy maszyn.

14. Rola sieci komunikacyjnych w procesie detekcji anomalii

Nie w każdym przypadku, dysponując pomiarami wskazującymi na znaczące odchylenie od normy gromadzonych pomiarów, możliwe jest sformułowanie jednoznacznej diagnozy mówiącej o rodzaju rozwijającego się uszkodzenia maszyny. W takiej sytuacji można jedynie powiedzieć, że stan techniczny wskazuje na jakąś anomalię. Rozpoznawanie anomalii może mieć miejsce w sposób intuicyjny, bazując na danych gromadzonych w DCS-ie bądź też w z pomocą



Rys. 9. Typowa sieć LAN stacji inżynierskiej systemu monitorowania umożliwiająca wspomaganie diagnostyczne w zarządzaniu stanem technicznym monitorowanych maszyn

systemów nadzoru dedykowanym ich detekcji. Systemy te nie posiadają ambicji prowadzenia diagnostyki maszyn w takim rozumieniu jak opisane w [11].

Systemy detekcji anomalii dzielą się na programowe oraz sprzętowe. Systemy sprzętowej detekcji anomalii mogą być stosowane dla agregatów napędzanych silnikami wykorzystującymi zasilanie prądem zmiennym [12]. W tym przypadku mogą być one włączone do sieci LAN, jak pokazana na rys. 5 i 6 (ale nie do tego fragmentu sieci, który realizuje skanującą akwizycję danych) lub na rys. 9.

I tak np. firma BENTLY NEVADA oferuje sprzętowe monitorowanie anomalii z pomocą systemu AnomAlert. Mogą one pracować niezależnie, a także mogą być włączone do sieci diagnostycznej SYSTEM 1. W tym przypadku do pojedynczego serwera SYSTEM 1 można podłączyć do 100 monitorów AnomAlert). Na rynku dostępne są także sieci LAN organizowane specjalnie dla monitorów detekcji anomalii. Np. firma ARTESIS wykorzystuje w tym celu oprogramowanie MCM-SCADA umożliwiające obsługę w sieci do 200 takich monitorów. W [12] zamieszczono kilka przykładów rozpoznawania anomalii z pomocą wymienionego rozwiązania sprzętowego.

Monitory sprzętowej detekcji anomalii posiadają wewnętrznie zaprogramowaną inteligencję umożliwiającą rozpoznawanie anomalii. Natomiast w niektórych przedsiębiorstwach są wykorzystywane zaawansowane sprzętowe zabezpieczenia elektryczne, które mogłyby być

wykorzystywane bardziej dojrzałe przez służby UR niż jedynie w celach zabezpieczeń. Dysponują one bowiem wyjściem buforowym, na którym są dostępne już w postaci cyfrowej próbkowane z wystarczająco wysoką częstotliwością przebiegi czasowe sygnałów elektrycznych. Dostęp do takich danych stwarza potencjalną możliwość postprocessingu podobnego do realizowanego w monitorach detekcji anomalii. Firma ARTE-SIS opracowała specjalizowany system iMCM [13], który umożliwia akwizycję danych z dużej grupy monitorów i zabezpieczeń silników elektrycznych (w tym m.in. M60 MPS, 469 MPS, 369 MPS, 339 MPS), a także generatorów (w tym m.in. G60 GPS). Wszystkie wymienione systemy zabezpieczeń posiadają wyjście sprzętowe umożliwiające link sieciowy do serwera akwizycji danych. W związku z tym, że zabezpieczenia te nie posiadają w swoim wnętrzu inteligencji dostępnej w monitorach detekcji anomalii, inteligencja ta została zaimplementowana w serwerze systemu iMCM. Na rys. 10 pokazano strukturę systemu, który może być zastosowany do diagnostyki agregatów z napędami elektrycznymi AC na bazie istniejącej już infrastruktury sieci przemysłowej. Po lewej stronie rysunku pokazano zbiór monitorów eMCM (które są nowszą wersją monitora AnomAlert), a po prawej zbiór różnych zabezpieczeń elektrycznych z serii GE MULTILIN. Wszystkie one mogą być podłączone do sieci i być obsługiwane przez stosowne, znajdujące się w tej sieci, serwery posiadające oprogramowanie dostosowane do obsługi wymienionego sprzętu.

Współcześnie gromadzone są olbrzymie zbiory danych, które w znacznej części nie podlegają bardziej zaawansowanemu przetwarzaniu. Tak więc równolegle do systemów sprzętowych detekcji anomalii mnożą się także systemy programowe. Dla tej klasy produktów jest dostępne zarówno oprogramowanie, które można zakupić²², jak i bezpłatne²³. Przewiduje się, że obszarem działania najbardziej intensywnie wdrażającym technologię IoT w ciągu najbliższych lat będzie energetyka. Szacuje się, że do roku 2027 zostanie tam na tę okoliczność zainwestowanych na świecie prawie 110 miliardów USD, co w konsekwencji doprowadzi do wzrostu CAGR²⁴ o 17,3% [14]. W znacznym stopniu wzrost ten zostanie osiągnięty dzięki intensyfikacji predykcyjnego podejścia do UR. Podobnie sytuacja przedstawia się w innych branżach. Na rys. 11 pokazano oszacowanie, ile danych jest gromadzonych dla wybranych aktywności prowadzonych w obszarze OLEJ & GAZ [14]. Większość z wymienionych danych nie podlega obecnie bardziej zaawansowanemu przetwarzaniu.

Programowe systemy detekcji anomalii wykorzystują na rzecz UR przede wszystkim dane gromadzone w DCS. Dane te są na ogół buforowane w komputerze odpowiedzialnym za gromadzenie historycznych danych procesowych oraz pomiarów dedykowanych ocenie stanu technicznego majątku produkcyjnego.



Rys. 10. Rozwiązania systemowe umożliwiające wnioskowanie o stanie technicznym, bazując na analizach widmowych prądów/napięć (SAD - Serwer Akwizycji Danych)



Rys. 11. Gromadzenie danych dla wybranych aktywności realizowanych w obszarze OLEJ i GAZ

Modelowy sposób prowadzenia wnioskowania w oparciu o gromadzone dane został pokazany na rys. 12. Wszelkie pomiary są gromadzone na komputerze opisanym na tym rysunku jako „Historian”. Dysponując wiedzą *a priori* o rodzaju pomiarów, które mogą być użyteczne dla rozpoznawania anomalii dla różnego majątku produkcyjnego, a także dla różnych procesów produkcyjnych, dokonuje się selekcji wybranych pomiarów (w ten sposób uzyskuje się Smart Data) i przeprowadza ich transmisję do komputera buforowego dedykowanego bezpośrednio zadaniu rozpoznawania anomalii. Komputer ten jest odizolowany od sieci technologicznej stosowaną zaporą sieciową. Specjalizowane oprogramowanie (np. PREDIX, Smart Signal) dla wybranego zbioru danych uczących (a więc takich, które wystarczająco dobrze opisują stan normalny) dokonuje wyznaczenia dla n_i -wymiarowej przestrzeni pomiarów granicy n_i^{GR} (zwanej w żargonie branży: obwiednią). Mając wyznaczoną obwiednię n_i^{GR} , można przejść do generowania ocen bieżących. Jeśli pomiary dla i-tego majątku lub procesu produkcyjnego znajdują się w przestrzeni pozostającej wewnątrz wyznaczonej obwiedni n_i^{GR} , to przyjmuje się, że odpowiadają one stanowi normalnemu. Natomiast jeśli pomiary znajdują się poza tą granicą, to wtedy są traktowane jako nienormalne, a więc świadczą o jakiejś anomalii.

Informacja o rozpoznanej anomalii, w zależności od tego, czy dotyczy ona procesu czy też stanu technicznego majątku, jest przekazywana odpowiednio do wiadomości pionu produkcji lub pionu UR.

Detekcja anomalii może być prowadzona w oparciu o oprogramowanie znajdujące się w posiadaniu przedsiębiorstwa lub też na warunkach outsourcingu. Wtedy usługodawca zewnętrzny, posiadając dostęp do historiana buforowego, może prowadzić sukcesywnie import danych i ich analizę. Jeśli rozpoznawanie anomalii jest realizowane wewnątrz przedsiębiorstwa, to serwer odpowiedzialny za ten proces może być podłączony zwrótnie do (1) sieci lokalnej wspomagającej proces produkcyjny i winien przekazywać do niej informacje o anomaliiach procesowych i/lub (2) do lokalnej sieci diagnostycznej wspomagającej pracę specjalistów z wydziału służb UR, które to służby winny być informowane zwrótnie o rozpoznanych anomaliiach majątku.

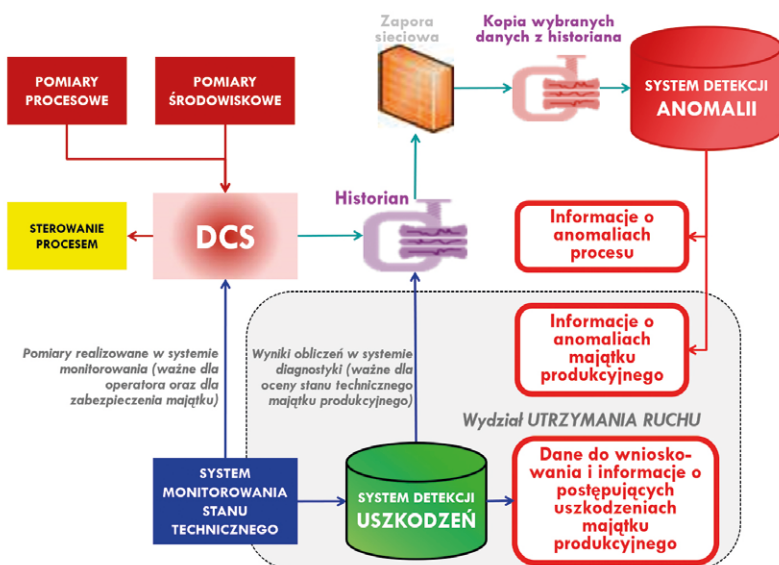
Pokazany na rys. 12 system detekcji uszkodzeń ogranicza w praktyce swoje działania do większości maszyn wirnikowych oraz do wybranych maszyn tłokowych. Natomiast w bez mała każdym przedsiębiorstwie znajduje się także statyczny majątek produkcyjny (transformatory, przegrzewacze, kolumny rektyfikacyjne, rurociągi etc.), który także winien być diagnozowany. System

detekcji anomalii może być pomocny w odniesieniu do takiego statycznego majątku produkcyjnego, który nie jest nadzorowany przez system detekcji uszkodzeń. Więcej uwag dotyczących granicy między funkcjonalnością typowych systemów diagnostycznych oraz systemów detekcji anomalii zawarto w [9, 15]. Natomiast w [16] pokazano kilka przykładów rozpoznawania anomalii stanu technicznego silników elektrycznych z pomocą podejścia programowego.

15. Przykład sprzętowego rozpoznawania anomalii

System rozpoznawania anomalii został zastosowany dla stosunkowo niewielkich agregatów, jakimi są wentylatory chłodni kominowych [15]. W analizowanym przypadku moc napędu wynosiła ~15 kW, a zatem koszt silnika był stosunkowo niewielki i wynosił dla nowego standardowego silnika ~2000 zł (a dla silnika klasy „premium” były w przybliżeniu dwukrotnie wyższy). Czas wymiany uszkodzonego silnika ważącego ~15 kg szacuje się w tym przypadku na 6 godzin przy zaangażowaniu 3-osobowego zespołu techników. Ten stosunkowo duży nakład robocizny jest powodowany skomplikowanym dostępem do silnika. W przypadku braku silnika zapasowego należy się liczyć z faktem, że procedura przewinięcia silnika zajmuje ~3 dni.

Na rys. 13 pokazano wybrane miary generowane przez system AnomAlert w ciągu około 4 miesięcy, a także dwa żółte kursory pionowe: pierwszy (w połowie października) wskazujący na pewne zdarzenie początkujące pogarszanie się integralności mechanicznej wentylatora i drugi (w połowie lutego), kiedy to stan techniczny został skorygowany. Trzy spośród tych pięciu miar to: osłabienie konstrukcji mechanicznej charakteryzujące się pewnym luzem (krzywa czerwona) oraz dwie krzywe przypisane pogarszaniu się stanu technicznego, charakteryzujące możliwość takich uszkodzeń, jak niewyważenie wirnika, pogorszenie osiowania, niepoprawność pracy sprzęgła (krzywe zielona i żółta – których zróżnicowanie polega na tym, że estymacja stanu jest dla nich realizowana w oparciu o dane gromadzone w różnych pasmach częstotliwości drgań elektrycznych).



Rys. 12. Powiązania między sieciami typu LAN użytkowanymi na rzecz wspomagania procesu produkcyjnego i zarządzania majątkiem produkcyjnym

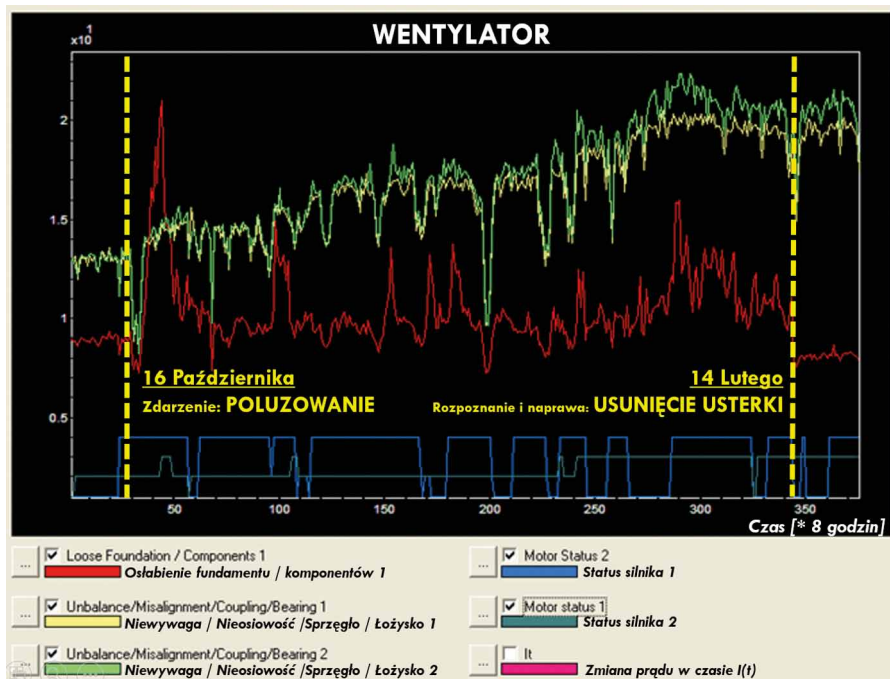
reklama

Do połowy października (a także po połowie lutego) krzywa czerwona cechuje się trendem poziomym o bardzo niewielkim rozrzucie wartości. Około połowy października nastąpiło zdarzenie (*post factum* można je opisać jako pojawienie się luzu mechanicznego), które powodowało znaczny rozrzut wartości krzywej czerwonej, a także postępujący trend wzrostu miar obrazowanych z pomocą krzywej żółtej i zielonej. Obserwowana zmiana estymat może być wytłumaczona w ten sposób, że w czasie kolejnych uruchomień i zatrzymań następowało powiększanie luzu mechanicznego, prowadzące do coraz większego niewyważenia wirnika w czasie, kiedy wentylator pracował.

W połowie lutego nastąpiło zidentyfikowanie poluzowania. Na rys. 14 pokazano jedną z czterech śrub łączących wirnik wentylatora z wirnikiem silnika, która była pierwszoplanowo odpowiedzialna za pojawienie się luzu mechanicznego, bowiem w czasie zrealizowanego w połowie lutego przeglądu stwierdzono brak nakrętki śruby.

Zauważmy, że skorygowanie pogłębiającej się niesprawności luzu mechanicznego nie spowodowało automatycznie skorygowania powiększonej w międzyczasie niewyważenia wirnika, a jedynie przyczyniło się do zahamowania jej dalszego wzrostu. Ta powiększona niewyważa prowadzi będzie teraz do skrócenia żywotności łożysk wirnika. Wcześniejsze skorygowanie połączenia tarczy wirnika zapobiegłoby długotrwałemu powiększaniu niewyważenia, a zatem przyczyniłoby się pierwotnie do mniejszej niewyważenia, co wtórnie prowadziłoby do wydłużenia czasu do remontu wymuszonego uszkodzeniem łożysk.

Na ogół przy wdrażaniu wspólnego systemu nadzoru stanu technicznego dąży się do zachowania pewnej proporcji między kosztem nadzorowanego majątku a kosztem tego systemu i stawia się wymóg, aby koszt ten był wielokrotnie niższy od wartości nadzorowanego majątku. Na początku tego przykładu intencjonalnie podano informację o koszcie silnika²⁵, bowiem w tym przypadku koszt wykorzystywanego systemu nadzoru był wyższy od kosztu silnika. Nie zmienia to jednak faktu, że w ocenie użytkownika nadzór takich wentylatorów z pomocą



Rys. 13. Historia zmiany wskazań wybranych miar generowanych przez AnomAlert nadzorujący wentylator



Rys. 14. Wirnik wentylatora ze wskazaną poluzowaną śrubą mocującą na sprzęgle

choćby systemu rozpoznawania anomalii jego pracy jest jak najbardziej zasadny. W niektórych przedsiębiorstwach wentylatory chłodnicze bywają nadzorowane z pomocą mechanicznych wyłączników drganiowych, natomiast takie rozwiązanie nie daje żadnej możliwości stosowania PdM [17].

AnomAlert może być także pomocny w przypadku nadzoru stanu technicznego wentylatorów chłodni o innej konstrukcji, np. takich, które są napędzane silnikami poprzez długie wały i przekładnie kątowe. Ich zużycie jest powodowane wysokimi obciążeniami i drganiami kątowymi, na które narażona jest konstrukcja przekazywania napędu. Dodatkowo wysoka temperatura otoczenia sprzyja przyspieszonemu starzeniu się oleju, a w konsekwencji pogarszaniu

jego właściwości smarnych i progresji zużycia współpracujących elementów.

W czasie surowych zimowych warunków pogodowych na wentylatorach chłodni kominowych może pojawić się oblodzenie, przyczyniając się bezpośrednio do pojawienia się podwyższonych drgań. To oblodzenie może powodować istotne powiększenie się poziomu drgań w warunkach rozruchu/zatrzymania, stąd należy dążyć do minimalizacji liczby stanów przejściowych.

16. Przykład programowego rozpoznawania anomalii

Oprogramowanie monitorowania anomalii nie jest w stanie rozpoznać szczegółowej zmiany stanu technicznego, natomiast jest doskonałym narzędziem do rozpoznawania nienormalności w pracy maszyny lub jej napędu. Omawiany tu przykład pochodzi z [15] i dotyczy wysokociśnieniowej pompy wody zasilającej. Na rys. 15 pokazano 10-dniową historię zmiany kilku typowych pomiarów wykorzystywanych na okoliczność oceny stanu technicznego pompy. Są to: informacja o prędkości obrotowej wirnika pompy, pomiary temperatury łożysk oraz pomiary drgań węzłów łożyskowych (należy domniemywać, że pompa jest łożyskowana tocznie,

reklama

bowiem pomiary drgań są prowadzone w jednostkach prędkości drgań [mm/s]).

W ciągu całego okresu obserwacji pojawiają się sporadyczne alarmy dla obu pomiarów realizowanych dla łożyska pompy po stronie sprzęgła. Natomiast 20 sierpnia następuje intensyfikacja tych alarmów i jednocześnie pojawia się znaczące odstępstwo od normalnego poziomu drgań w węzle łożyskowym po stronie zewnętrznej pompy, co skutkuje podjęciem decyzji o odstawieniu pompy celem dokonania jej przeglądu. W czasie tego przeglądu dokonano rozpoznania poważnego pęknięcia wirnika pompy.

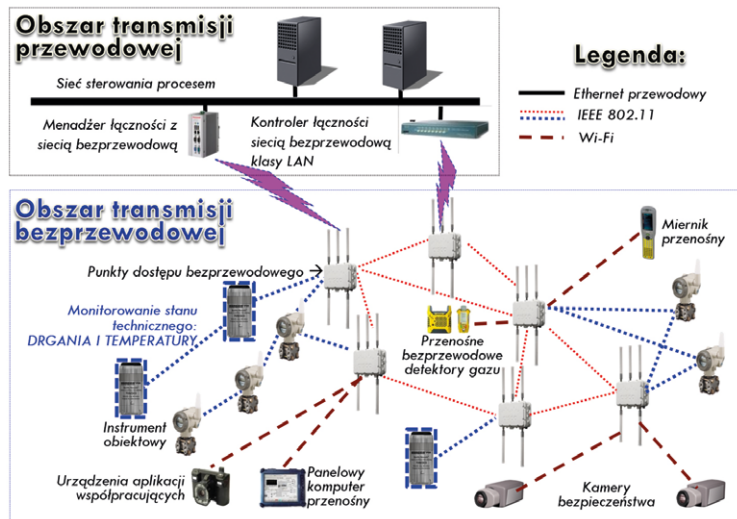
Bazując na powyższych danych, nie można stwierdzić jednoznacznie, że alarmy obserwowane dla łożyska pompy od strony sprzęgła, w czasie poprzedzającym zaznaczone na rysunku „pierwsze ostrzeżenie”, były spowodowane postępującym pękaniem wirnika pompy, choćby z tego względu, że wyżej zaprezentowane dane nie pozwalają ocenić, kiedy ww. pęknięcie się zapoczątkowało. Bardziej prawdopodobne jest oszacowanie, że istotne pęknięcie wirnika pompy jest rozpoznane po zmianie poziomu drgań w węzle po stronie zewnętrznej pompy, co zostało zauważone na około dwa dni przed jej zatrzymaniem i pociągnęło za sobą konieczność odstawienia agregatu. Zmiana poziomu drgań w tym łożysku jest skorelowana także z powolnym (choć nieco opóźnionym w czasie) wzrostem poziomu drgań w łożysku przysprzęglowym. W tym też łożysku następuje intensyfikacja alarmów temperaturowych.

17. Wielozadaniowe sieci komunikacyjne klasy LAN

Maszyny pomocnicze nie wymagają tak silnych systemów monitorowania stanu technicznego, jak stosowane dla maszyn krytycznych. Na rys. 6 pokazano przewodowy system skaningowy, dedykowany nadzorowi majątku niekrytycznego. Systemy skaningowe występują także coraz częściej w wersji bezprzewodowej. W niektórych przedsiębiorstwach dla pomiarów o mniejszej ważności stosuje się bezprzewodowe przetworniki i/lub bezprzewodowe czujniki. O ile jednak w systemie przewodowym pokazanym na rys. 6 realizowane pomiary są prowadzone wyłącznie na rzecz oceny



Rys. 15. Rozpoznanie anomalii ST pompy



Rys. 16. Bezprzewodowy system transmisji danych pomiarowych dedykowanych procesowi i nadzorowi stanu technicznego

stanu technicznego, o tyle w systemach bezprzewodowych do sieci mogą być podłączone zarówno czujniki realizujące pomiary procesowe, jak i te dla oceny stanu technicznego. Na rys. 16 pokazano przykład takiego wielozadaniowego systemu, wykorzystującego zróżnicowane media i protokoły transmisji dostępne w ramach sieci bezprzewodowej.

Sieć ta jest przyłączona do sieci przewodowej (co pokazano w górnej części rysunku), w której następuje przekazywanie pomiarów – procesowych do komputerów współuczestniczących w sterowaniu procesem, natomiast pomiarów informujących o stanie technicznym (na ogół drgania i temperatury) do sieci LAN, np. z serwerem SYSTEM 1*

Evo, podobnie jak to ma miejsce na schemacie pokazanym na rys. 6.

Na rys. 17 pokazano przykładową strukturę systemu, który zawiera zarówno systemy monitorowania i zabezpieczeń dedykowane dla maszyn wysoce krytycznych (po lewej dolnej stronie rysunku), jak i dla maszyn o niskim stopniu krytyczności, dla których są wykorzystywane bezprzewodowe czujniki drgań i temperatury RANGER Pro (pokazane z prawej strony rysunku).

18. Systemy przenośne w UR i ich powiązanie z IoT

W szeregu przedsiębiorstw dla oceny stanu technicznego jest także wykorzystywany sprzęt przenośny umożliwiający

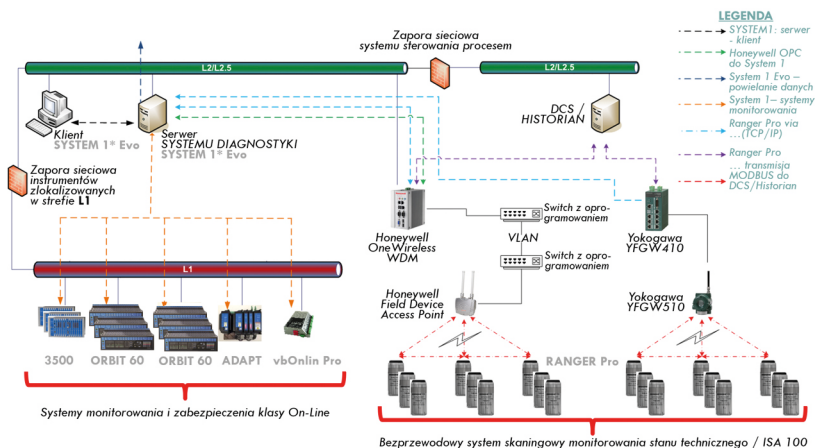
reklama

prowadzenie m.in. analiz termowizyjnych, oleju, elektrycznych, a także analizy drgań mechanicznych. W takim przypadku można wyróżnić następujące scenariusze wykorzystania sprzętu przenośnego w przypadku przedsiębiorstw, w których:

- wykorzystywany już jest system nadzoru stanu technicznego klasy online dla maszyn krytycznych: dane gromadzone z pomocą sprzętu przenośnego wchodzą:
 - w tę samą bazę danych, która jest wykorzystywana dla maszyn krytycznych,
 - w inną bazę danych niż wykorzystywana dla maszyn krytycznych;
- brak jest systemu diagnostyki klasy online: w takim przypadku rodzaj bazy danych, w której gromadzone są dane z pomocą sprzętu przenośnego, nie stanowi kryterium pierwszej ważności. Współcześnie obserwuje się rewolucyjny postęp w rozwiązaniach technicznych stosowanych dla przenośnych zbieraczy danych. Najnowsze rozwiązania oferują zbieracze danych, które:

- nie posiadają własnego wyświetlacza, a jako wyświetlacz jest wykorzystywany telefon typu smartfon; transmisja danych między zbieraczem a smartfonem odbywa się oczywiście bezprzewodowo;
- zanika także proces zrzucania danych ze zbieracza na komputer służący ich gromadzeniu i dalszemu przetwarzaniu; zarejestrowane na maszynach dane transmitowane są na bieżąco ze smartfona do bazy danych w „chmurze”, a także simultanicznie
- następuje transfer danych historycznych zgromadzonych w „chmurze” umożliwiający prezentację trendu zmian symptomu ST dla punktu, w którym prowadzony jest pomiar.

Na rys. 18 pokazano komponenty rozwiązania systemowego wraz z wykorzystującym je specjalistą. Dysponuje on niewielkim przyrządem, do którego są podłączone czujniki i który nie posiada innych możliwości bezpośredniego (z pomocą kabla czy wyświetlacza) komunikowania się z otoczeniem. Do przeglądu danych oraz do bieżącego konfigurowania zbieracza wykorzystywana jest specjalna aplikacja diagnostyczna dedykowana dla



Rys. 17. Systemy online oraz skanujący system bezprzewodowy RANGER Pro podłączone do jednego systemu diagnostyki



Rys. 18. Dane gromadzone z pomocą sprzętu przenośnego wspomaganego smartfonem z aplikacją diagnostyczną dedykowaną jego obsłudze

smartfona. Transmisja danych między zbieraczem a smartfonem jest także realizowana bezprzewodowo.

Alternatywnie „ślepy zbieracz danych” może być również obsługiwany z pomocą tabletu. W tym przypadku dysponuje się jeszcze bardziej komfortowym wyświetlaczem, bowiem dzięki większym gabarytom w porównaniu ze smartfonem zapewnia on lepsze możliwości prezentacji gromadzonych i przetwarzanych danych.

Decydując się na stosowanie sprzętu przenośnego dla pomiarów drgań mechanicznych, należy wciąż pamiętać, kiedy takie podejście jest poprawne, a kiedy jedynie częściowo użyteczne. I tak technika taka jest:

- całkowicie poprawna dla większości maszyn łożyskowanych tocznie;
- jeszcze dopuszczalna w przypadku maszyn łożyskowanych ślizgowo

i posiadających stojaki łożyskowe o niewielkiej sztywności;

- mało efektywna w przypadku maszyn łożyskowanych ślizgowo i posiadających sztywne węzły łożyskowe, zintegrowane z korpusem maszyny; w tym przypadku wykonywane pomiary winny być traktowane jako pomocnicze, bowiem pierwszoplanowo do oceny stanu wymaga się prowadzenia pomiarów drgań wału, do czego jest konieczne zastosowanie czujników bezkontaktowych, które praktycznie są bardzo rzadko wykorzystywane w zestawach przenośnych.

19. Rozległe sieci komunikacyjne

Sieci, które rozciągają się na dużym obszarze geograficznym (roległe przedsiębiorstwo, województwo, kraj, świat), wykorzystują na ogół infrastrukturę udostępnioną w ramach outsourcingu. Są to

reklama

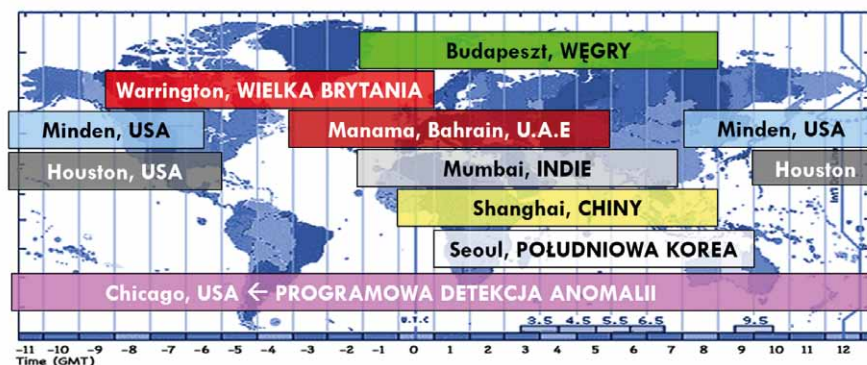
zatem sieci komunikacyjne o zasięgu globalnym i nazywane są sieciami WAN (Wide Area Networks).

Stosowanie sieci WAN może mieć miejsce wewnątrz jednego przedsiębiorstwa, jak również między różnymi przedsiębiorstwami. I tak sieć typu WAN:

- może być np. wykorzystywana przez właściciela kilku farm wiatrowych, który posiada odległe centrum nadzoru stanu technicznego, tak jak to zostało zaznaczone na rys. 7;
- są wykorzystywane na świecie dla celów diagnostycznych praktycznie przez wszystkie koncerny międzynarodowe z obszaru produkcji energii oraz z obszaru O&G;
- są stosowane przez wiele przedsiębiorstw działających na terenie jednego kraju, np. kilka norweskich przedsiębiorstw celem prowadzenia diagnostyki majątku pracującego na platformach wydobywczych wykorzystuje odległe firmowe centra diagnostyczne usytuowane na lądzie i poprzez połączenia sieciowe typu WAN monitoruje pracę turbin, sprzężarek, pomp, silników, generatorów, etc. zlokalizowanych na platformach;
- są wykorzystywane w Polsce na użytek diagnostyki przez nieliczne koncerny energetyczne (TAURON i w części PGE przynależącej wcześniej do EDF), które mają stworzone centralne biuro diagnostyczne²⁶.

Rozwiązania sieciowe typu WAN są często również wykorzystywane w przypadkach wychodzących poza ramy jednego przedsiębiorstwa lub koncernu. Na rys. 19 wymieniono serwisy diagnostyczne BENTLY NEVADA, które realizują kontrakty na prowadzenie diagnostyki maszyn w różnych przedsiębiorstwach na odległość. Na rysunku pokazano także strefy czasowe pokryte przez poszczególne biura.

Oczywiście, w sposób podobny do pokazanego na rys. 19 usługi outsourcingowe mogą być realizowane przez każdą inną firmę, w tym także przez producentów maszyn. W każdym przypadku warunkiem jest uzgodnienie z przedsiębiorstwem zainteresowanym serwisem formy dostępu i uzyskanie haseł umożliwiających dostęp do danych gromadzonych w ramach systemów online.



Rys. 19. Lokalizacja odległych centrów diagnostycznych BENTLY NEVADA

Połączenia sieciowe WAN bywają też wykorzystywane doraźnie do połączeń odległych zarówno do sieci LAN dedykowanych systemom diagnostyki online, jak i do okazjonalnego gromadzenia danych z pomocą przenośnych systemów diagnostyki ADRE for Windows. Dla przykładu w Polsce, celem minimalizacji wielogodzinnych przejazdów i w konsekwencji obniżenia kosztów połączenia do serwera diagnostyki online zlokalizowanego w Nowej Sarzynie z Elbląga, a więc z miejsca pracy eksperta diagnostycznego.

20. Interfejsowanie sieci diagnostycznych z systemami EAM

Od wielu lat przedsiębiorstwa wdrażają oprogramowanie klasy EAM (Enterprise Asset Management) mające pomagać w zarządzaniu majątkiem przedsiębiorstwa. Oprogramowanie to umożliwia scentralizowane zarządzanie wszelkiego typu zasobami, w tym zasobami produkcyjnymi, infrastrukturalnymi, instalacyjnymi, transportowymi i komunikacyjnymi. Praktycznie każde większe przedsiębiorstwo wykorzystuje w tym celu jakieś oprogramowanie biznesowe, które wspomaga także działania prowadzone w ramach UR. Przykładem takich rozwiązań programowych mogą być: SAP, IBM MAXIMO czy ORACLE E-Business Suite. System EAM lub jego wybrane moduły (np. w przypadku SAP-a: FI-AA dla majątku trwałego czy PM dla utrzymania ruchu) stosuje praktycznie każde większe przedsiębiorstwo i z reguły duże grono jego specjalistów, z pozycji swoich komputerów osobistych, posiada dostęp sieciowy do baz danych

tego oprogramowania. Z wymienionym oprogramowaniem celowe jest również interfejsowanie systemów wspomagających funkcjonowanie UR, a więc SM&Z, systemów detekcji anomalii i systemów diagnostyki online i offline.

21. Bezpieczeństwo cybernetyczne w sieciach diagnostycznych

Systemy nadzoru stanu technicznego, podobnie jak wszelkie inne systemy komputerowe, nawet takie, które pracują w sieciach LAN, są narażone na ataki cybernetyczne [18]. Możliwe są następujące drogi naruszenia bezpieczeństwa cybernetycznego jakiegoś komponentu systemu nadzoru poprzez:

- sieć komunikacyjną wykorzystującą transmisję bezprzewodową (jak pokazana na rys. 16);
- przyrządy przenośne wykorzystujące technologię bezprzewodową komunikacji krótkiego zasięgu Bluetooth i komunikujące się poprzez połączenie sieciowe z serwerem systemu diagnostyki zlokalizowanym w sieci LAN;
- dostęp odległy do stacji inżynierskiej systemu monitorowania i zabezpieczeń, jak to pokazano na rys. 9;
- dostęp do systemu monitorowania i zabezpieczeń od strony systemu diagnostyki; z tego względu dla niektórych aplikacji (np. aplikacje w energetyce jądrowej) wymaga się braku możliwości dostępu z komputerów do systemów cyfrowych pracujących w strefie, dla której wymagany jest poziom bezpieczeństwa 4; komputery takie, a w konsekwencji i procesory komunikacyjne systemu diagnostyki, muszą być zlokalizowane w strefie o poziomie bezpieczeństwa 2; w konsekwencji dla systemu diagnostyki wymagane jest

stosowanie procesorów komunikacyjnych, które konstrukcyjnie nie są zintegrowane z kasetą systemu monitorowania i zabezpieczeń (przykładem takiego zewnętrznego procesora komunikacyjnego jest TDISecure);

- dostęp do serwera systemu diagnostyki jako konsekwencji umowy outsourcingowej i konieczności dostępu odległego przez firmę realizującą tę umowę;
- dostęp do serwera systemu detekcji anomalii jako konsekwencji umowy outsourcingowej i konieczności dostępu odległego przez firmę realizującą tę umowę.

Na okoliczność zwiększenia bezpieczeństwa cybernetycznego, w tym także sieci komunikacyjnych, zostało opracowanych już szereg standardów i generowane są ciągle nowe. Krótki przegląd najważniejszych z nich zamieszczono w [18]. W celu zapewnienia bezpieczeństwa cybernetycznego najlepiej jest wykorzystywać rozwiązania sprzętowe i programowe, które posiadają certyfikat Achillesa. Dla zapewnienia bezpieczeństwa w sieci LAN może być wymagane zastosowanie specjalizowanego osprzętu sieciowego.

22. Posłowie do tematyki sieciowej

W artykule wielokrotnie przewijało się słowo serwer dla takiej czy innej sieci diagnostycznej. Jest faktem, że pierwsze systemy diagnostyki wymagały korzystania z serwerów dedykowanych na ogół pojedynczej aplikacji diagnostycznej. Natomiast od szeregu lat możliwe jest wykorzystywanie w tym celu serwerów wirtualnych. Są to wydzielone wirtualnie (poprzez specjalny program) serwery z fizycznego bardzo wydajnego serwera, co oznacza, że na jednym serwerze fizycznym istnieje wiele serwerów wirtualnych dedykowanych realizacji różnych zadań, które współdzielą zasoby, np. różnego typu pamięci czy czas pracy procesorów. Jednym z tych zadań może być obsługa sieci diagnostycznej. Serwery wirtualne posiadają m.in. tę korzystną cechę, że w przypadku awarii technicznej jakiegoś elementu serwera ewentualna przerwa w gromadzeniu danych diagnostycznych jest sprowadzona do minimum. W przypadku stosowania typowego serwera jego uszkodzenie powodowało na ogół

zawieszenie działania sieci diagnostycznej na okres od kilku dni do kilku tygodni, a często wymagało także interwencji serwisu dostawcy oprogramowania diagnostycznego. W Polsce serwery wirtualne obsługujące diagnostyczne sieci LAN po raz pierwszy zostały zastosowane w Elektrowni Turów w roku 2009, a współcześnie są także wykorzystywane w szeregu innych przedsiębiorstw, jak np. w Elektrowni Bełchatów, PKN ORLEN czy Z. Ch. Police.

W świecie szeroko pojmowanego IT chmura to jeden z trendów, który rozwija się dynamicznie i w konsekwencji obserwujemy jej stale rosnącą rolę. Tą najbardziej znaną jest chmura publiczna. Natomiast tą bardziej związaną z zastosowaniami technicznymi jest chmura obliczeniowa (*cloud computing*). Chmura jest swojego rodzaju modelem świadczenia usług opartym na zewnętrznej infrastrukturze dostawcy. Np. skomplikowane systemy ERP mogą działać w chmurze, umożliwiając upoważnionym osobom wgląd w dane firmowe z pozycji czy to komputera osobistego, czy też smartfonu. Stąd już tylko krok do przemysłowego Internetu.

Pierwszym na świecie systemem operacyjnym dla aplikacji przemysłowych w chmurze jest uruchomiona około roku 2016 platforma PREDIX [19]. Jej przeznaczenie jest bardzo szerokie i dedykowane praktycznie wszystkim obszarom działalności człowieka, w tym m.in. zarządzaniu energią, działalnością w obszarze ropy i gazu, produkcją elektryczności i słodkiej wody, wszelkim formom transportu, w tym także lotniczego, opiece medycznej i innym. Pozostając w obszarze tematu artykułu i ograniczając się do UR, PREDIX pozwala klientom na wykorzystywanie wszystkich narzędzi swojej platformy, które mogą być pomocne do prowadzenia racjonalnego UR, w tym m.in.: wspomaga proces prognozowania wystąpienia potencjalnych problemów z majątkiem, przechowuje dane, wspomaga prowadzenie różnych specyficznych (wcześniej omówionych) form UR, przyczynia się do zmniejszenia udziału reakcyjnego UR w UR przedsiębiorstwa.

Można spodziewać się, że już wkrótce znaczenie diagnostycznej sieci LAN zredukuje się do gromadzenia

danych, a cała niezbędna analityka, w tym również ekspertowe wspomaganie wnioskowania diagnostycznego oraz rozpoznawanie anomalii tak w odniesieniu do majątku produkcyjnego, jak i do procesów produkcyjnych, będzie realizowana z pomocą platformy PREDIX lub jakiegoś podobnego do niej systemu operacyjnego właściwego dla Internetu przemysłowego.

23. Przykłady korzyści ze stosowania IIoT

Międzynarodowy producent wyposażenia medycznego w swoich przedsiębiorstwach zaobserwował wzrost o 78% przypadków problemów serwisowych, które zostały z sukcesem zdiagnozowane „na odległość”, bez konieczności fizycznej wizyty serwisu firmowego na obiekcie.

Jedna z firm fińskich nadzorujących sieci energetyczne wykorzystuje drony do kontrolowania ryzyka uszkodzenia sieci przez wywracające się drzewa. Wykorzystanie dronów pozwoliło na obniżenie kosztów kontroli zagrożenia sieci uszkodzeniem o ~30%.

Jedna z firm niemieckich wdraża program gromadzenia sygnałów z czujników drgań zainstalowanych na pojazdach szynowych celem rozpoznania wczesnego stadium uszkodzania się torowiska. Zespół wdrażający jest przekonany, że tą drogą doprowadzą do zmniejszenia kosztów utrzymania torowiska o 25%, co w przypadku, gdy koszty te zazwyczaj przekraczają miliardy dolarów rocznie, jest nie bez znaczenia.

Ponieważ rozwiązania IIoT wykorzystują dane gromadzone z maszyn w czasie rzeczywistym, a również w czasie rzeczywistym realizowane są zaawansowane analizy w celu określenia stanu technicznego sprzętu, umożliwiają one prognozowanie nawet szybko rozwijających się awarii i w konsekwencji zapobieganie im. W efekcie producenci mogą znacznie poprawić obsługę klienta, a operatorzy mogą zmaksymalizować czas pracy urządzeń produkcyjnych.

Jest pewnikiem, że stosowanie bardziej zaawansowanej strategii UR dla maszyn krytycznych i innych urządzeń ważnych dla procesu produkcyjnego prowadzi do obniżenia ich kosztów UR.

W związku z potęgującym się zapotrzebowaniem na rozwiązania techniczne

wspomagające wdrożenia i optymalizację IIoT, Gartner Inc. przewidywał, że w roku 2020 na świecie będzie użytkowanych na tę okoliczność 26 miliardów urządzeń. Ich zastosowanie prowadzić będzie m.in. do lepszego szacowania takich wskaźników niezawodności jak MTBF²⁷ czy MTTR²⁸ w zależności od lepszej znajomości historii obciążenia podobnych maszyn i urządzeń, a także od jakości prowadzenia działań remontowo-obługowych.

Postępujący proces optymalizacji pozwoli na automatyczne uploadowanie nowszych wersji oprogramowania/sterowania do urządzeń cyfrowych podłączonych do Internetu przemysłowego.

24. Zakończenie

Dążenie na kierunku wdrożenia Przemysłu 4.0 jest realizowane w różny sposób przez różne przedsiębiorstwa. Część z nich intensyfikuje działania na kierunku Internetu Rzeczy, a część na Big Data.

Na rys. 20 [8] pokazano oszacowanie, ile przedsiębiorstw na świecie jest skoncentrowanych na działaniach na jednym bądź też drugim kierunku. Z zestawienia tego wynika, że jedynie ~8% przedsiębiorstw planujących wejście do klubu Przemysł 4.0 prowadzi działania na obu wymienionych obszarach.

IoT jest wdrażane na kierunku wszelkiej działalności człowieka. Szacuje się, że udział obszaru OIL & ENERGY w procesie inwestycyjnym dla IoT w skali świata wynosi 1,6%. Inwestycje te w znacznym stopniu ukierunkowane są na polepszenie systemów monitorowania²⁹.

IoT (lepiej: IIoT) może być pomocny w:

- lepszym niż dotychczas rozpoznawaniu uszkodzeń maszyn oraz prognozowaniu ich dostępności na rzecz realizowanego procesu produkcyjnego;
- zwiększeniu niezawodności produkcji dzięki możliwości bardziej zaawansowanej i wszechstronnej analizy sygnałów z czujników zainstalowanych na maszynach;
- optymalizacji zarządzania zasobami tak z punktu widzenia zarządzania częściami zamiennymi, jak i serwisem (własny lub outsourcingowy);
- minimalizacji nieplanowanych przestoju oraz optymalizacji harmono-



Rys. 20. Zroźnicowanie zainteresowania przedsiębiorstw na świecie w dążeniu do zastosowania wybranych narzędzi Przemysłu 4.0


gramu działań konserwacyjnych, a w konsekwencji zwiększenia produktywności przedsiębiorstwa;

- polepszaniu strategii UR przedsiębiorstwa dzięki łatwiejszej możliwości wdrożenia bardziej zaawansowanej formy utrzymania środków produkcji w ruchu.

Przypisy

1. CBM – *Condition Based Maintenance*.
 2. Do końca lat sześćdziesiątych XX wieku praktycznie wszystkie układy sterowania maszyn i urządzeń, zarówno wykonywane w tradycyjnej technice przekaźnikowo-stycznikowej, jak i w technice półprzewodnikowej, były konstruowane jako sztywna sieć logiczna. Rolę programu spełniało okablowanie pomiędzy stycznikami, przekaźnikami oraz innymi elementami specjalnymi, a całość instalowano w szafach sterowniczych. Sterowanie takie cechowało się brakiem elastyczności i koniecznością dużych nakładów pracy w celu przestawienia procesu, a także sporą zawodnością, będącą konsekwencją brudzących się styków czy luzujących kabli. To z tamtych lat pochodzi powiedzenie: *Five hours to find it and five minutes to fix it*, czyli „Poszukiwanie problemu przez 5 godzin, aby go zlikwidować w ciągu 5 minut”.
 3. W roku 1968 Bill Stone pracujący z zespołem inżynierów w Hydramatic Division, będącej częścią General Motors Corp., zaprezentował na konferencji organizowanej przez firmę Westinghouse pomysł wprowadzenia sterowania nowego typu, w którym algorytm działania zapisywany byłby nie z pomocą „odrutowania”, lecz w pamięci. W roku 1970 na wystawie obrabiarek w Chicago przedstawiono pierwszy system sterowania
4. PLC (ang. *Programmable Logic Controller*) – uniwersalne urządzenie mikroprocesorowe przeznaczone do sterowania pracą maszyny lub urządzenia technologicznego.
 5. Przez usieciowienie rozumie się integrację systemów prowadzącą do powstania sieci.
 6. IT – *Information Technology*, czyli technologia informatyczna, informatyka.
 7. Firma ARC wprowadziła w roku 1999 pojęcie Plant Asset Management, czyli: system zarządzania majątkiem na poziomie zakładu, które wkrótce potem zostało rozszerzone na Enterprise Asset Management, czyli: system zarządzania majątkiem na poziomie przedsiębiorstwa/koncernu.
 8. W piśmiennictwie angielskim: *Reactive Maintenance* (RM) lub *Run-to-Failure Maintenance* (RtF).
 9. W piśmiennictwie angielskim: *Preventive Maintenance* (PM). Przyjmuje się, że koszty UR bazujące na PM są w niektórych branżach nawet 4 razy niższe niż w przypadku wykorzystywania RtF.
 10. W piśmiennictwie angielskim: *Predictive Maintenance* (PdM).
 11. Tu należy pamiętać, że nie sama liczba czujników się liczy. Równie ważne (a nawet ważniejsze) są: ich poprawny dobór, wybór miejsca mocowania i przygotowanie utwierdzenia.
 12. W piśmiennictwie angielskim: *Proactive Maintenance* (PaM).
 13. W piśmiennictwie angielskim: *Performance Based Maintenance* (PbM).
 14. W piśmiennictwie angielskim: *Prescriptive Maintenance* (PsM).
 15. Termin „analiza preskryptywna” został po raz pierwszy użyty przez IBM w roku 2010 [3] i bezpośrednio po tym wystąpiono o jego zastrzeżenie jako znaku towarowego, co zostało sfinalizowane około rok później (JUSTIA Trademarks: Nr rejestracji 4032907).
 16. Hadoop jest systemem rozproszonego przechowywania i przetwarzania plików, którego pierwsza wersja pojawiła się w końcu roku 2011, a wersja najnowsza pochodzi ze stycznia 2019

- roku. Dane są rozproszone na wielu serwerach i dzielone na bloki, które zostają rozdyskrebowane pomiędzy węzłami. Natomiast metadane, pozwalające uzyskać dostęp do określonego fragmentu pliku, przechowywane są w pamięci operacyjnej serwera NameNode. Hadoop jest platformą uruchamianą w systemie Linux. W związku z nawiązaniem współpracy między firmami Hortonworks i Microsoft – dostępna jest również jej wersja działająca w systemie MS Windows.
17. Przykładem zastosowania Smart Data na rzecz lepszego UR są np. programowe systemy detekcji anomalii (o których w dalszej części artykułu). W tym przypadku z wielu pomiarów zapisywanych na komputerze gromadzącym informacje historyczne (Historian Computer) wybiera się takie, które umożliwiają charakterystykę stanu technicznego jakiejś maszyny co najmniej w zakresie: normalny *versus* nienormalny.
 18. Bardziej precyzyjnie: GE działa w obszarze IIoT, gdzie skrót ten oznacza *Industrial Internet of Things* (Przemysłowy Internet Rzeczy) i stanowi jedynie fragment obszaru zainteresowania IoT.
 19. W roku 2018 światowa moc zainstalowana energetyki wiatrowej wyniosła 591 GW i przewiduje się, że do końca roku bieżącego potencjał ten wzrośnie do 792 GW. W Polsce moc zainstalowana instalacji wykorzystujących energię wiatru wynosi ~6 GW.
 20. TIM – *Transducer Interface Module*.
 21. Pierwszym wielokanałowym systemem monitorowania i zabezpieczeń wykonanym w technice cyfrowej był SYSTEM 3300, który wszedł do sprzedaży w roku 1988.
 22. W tej kategorii za najlepsze uznaje się aktualnie [14]: Numenta, AVORA, Splunk Enterprise, Loom Systems, Elastic X-Pack, Anodot oraz CrunchMetrics.
 23. W tej kategorii za najlepsze uznaje się aktualnie [14]: Weka Dara Mining, Shogun, RapidMiner, Starter Edition, Dataiku DSS Community, ELKI oraz Scikit-learn.
 24. CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) – złożona roczna stopa wzrostu jest współczynnikiem służącym do obliczania stałej stopy zwrotu na przestrzeni lat. Jest on wykorzystywany do porównywania danych dotyczących wzrostu przychodów firm należących do tego samego sektora lub tej samej branży.
 25. *De facto* wartość silnika winna być powiększona o wartość wentylatora – natomiast koszt ten autorowi nie jest znany.
 26. Pierwsza odległa transmisja danych diagnostycznych z polskiego przedsiębiorstwa miała miejsce w roku 1994 i była przeprowadzona na Maltę z pomocą linii telefonicznej i modemów.
 27. MTBF – *Mean Time Between Failures*, czyli średni czas pracy bezawaryjnej.
 28. MTTR – *Mean Time To Repair*, czyli średni czas naprawy
 29. W [8] podano, bazując na analizach inwestycji w ramach ItO zrealizowanych na świecie w roku 2016, że 8% z nich było ukierunkowanych właśnie na systemy monitorowania (co stanowi znaczący udział, jeśli wziąć dodatkowo pod uwagę, że na pierwszym miejscu tych inwestycji były inwestycje realizowane dla obronności i stanowiły one 14%).
- ### Literatura
- [1] KOVACEVIC J.: *What is prescriptive maintenance*. Eruditio, LLC, JUN 2017 <https://hpreliability.com/what-is-prescriptive-maintenance/>
 - [2] BONFIETTI A.: *Predictive and Prescriptive Maintenance*. Prezentacja MindIT, marzec 2018.
 - [3] LUSTIG I., DIETRICH B., JOHNSON CH., DZIEKAN CH.: *The Analytics Journey*. Analytics, Nov–Dec 2010.
 - [4] *Preskryptywne utrzymanie ruchu*. Październik 2018, <https://www.utrzymanieruchu.pl/preskryptywne-utrzymanie-ruchu/>
 - [5] GIRDHAR P., SCHEFFER C.: *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. 2004, IDC Technologies.
 - [6] NOWICKI R.: *Zależność między strategią UR, rodzajem systemu monitorowania i niezawodnością maszyn wirnikowych*. „Pompy i Pompownie”, 1/2011.
 - [7] Bangemann Report, *Europe and the Global Information Society: Recommendations to the European Council*, 1994.
 - [8] NAIMAT A.: *The Internet of Things Market, A Data-Driven Analysis of Companies Developing and Adopting ItO Technology*. O'REILLY MEDIA, 2017.
 - [9] NOWICKI R.: *Ku lepszemu: możliwości systemowe w utrzymaniu ruchu – cz. 1*. „Chemia Przemysłowa”, 3(609)/2015.
 - [10] NOWICKI R.: *Multi State Analysis in Condition Management*. ORBIT, Vol. 34, No. 2, 2014, p. 25.
 - [11] CEMPEL Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT, Warszawa 1982.
 - [12] SONG J., NOWICKI R., DUYAR A.: *Sprzętowe rozpoznawanie anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*. „Napędy i Sterowanie” 1/2014.
 - [13] DUYAR A., NOWICKI R., EKER Ö.F.: *Zróżnicowanie systemów online monitorowania stanu technicznego silników elektrycznych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 111–3/2016.
 - [14] NALYVAIKO O.: *Anomaly Detection Solutions for Predictive Maintenance of Industrial Equipment (...)*. 2020-JAN-17, www.infopulse.com.
 - [15] NOWICKI R.: *Ku lepszemu: możliwości systemowe w utrzymaniu ruchu – cz. 2*. „Chemia Przemysłowa” 4–5(612)/2015.
 - [16] NOWICKI R., BATE M.: *Programowe rozpoznawanie anomalii pracy agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi*. „Napędy i Sterowanie” 12/2013.
 - [17] NOWICKI R.: *Czarny humor UR – Odcinek 9: Zabezpieczenie maszyny czy... ruletka*. „Służby Utrzymania Ruchu”, 3/2019.
 - [18] NOWICKI R.: *Problemy bezpieczeństwa cybernetycznego w zakresie stosowania systemów nadzoru stanu technicznego majątku produkcyjnego*. „Napędy i Sterowanie” 7–8/2016.
 - [19] WINKLER S.: *Predix Architecture and Services*, Technical Whitepaper, SEP 2015.

 dr inż. Ryszard Nowicki
e-mail: Ryszard.Nowicki@vp.pl
niezależny ekspert, NOVITECH+