

# Intelligent sensors in modern machine tools

## Inteligentne czujniki we współczesnych obrabiarkach

PIOTR SZULEWSKI  
DOMINIKA ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA  
MIROSLAW NEJMAN\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.91>

The paper illuminates the basic information on the use of sensors in industrial measurement systems with particular reference to machine tools. The most important technical-utility parameters were presented and criteria helpful in the selection of sensors for practical applications were indicated. The latest generation of intelligent sensors was also presented, focusing on their possibilities of cooperation with information systems (Internet of Things) and the idea of Industry 4.0.

KEYWORDS: Industry 4.0, intelligent sensors, monitoring and supervision, IoT

Omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące stosowania czujników w przemysłowych systemach pomiarowych ze szczególnym uwzględnieniem obrabiarek. Przedstawiono ich najważniejsze parametry techniczno-użytkowe oraz wskazano kryteria pomocne podczas doboru sensorów w praktyce. Zaprezentowano także najnowszą generację czujników inteligentnych, a przede wszystkim możliwości ich współpracy z systemami informatycznymi (internet rzeczy) i ideą przemysłu 4.0.

SŁOWA KLUCZOWE: przemysł 4.0, inteligentne czujniki, monitorowanie i nadzór, internet rzeczy

### Wprowadzenie

Współczesne obrabiarki to skomplikowane urządzenia, zbudowane z licznych elementów, zespołów i podsystemów (korpusu, napędów, sterowników itp.) wspólnie odpowiedzialnych za proces obróbki, na który nierzadko składa się wiele zaawansowanych zabiegów oraz operacji [1]. Aby zapewnić wymaganą dokładność obróbki oraz wysoką jakość i akceptowalny koszt wytwarzania, konieczne jest stałe monitorowanie procesu [2]. Dodatkowym problemem jest dostępność i wykorzystanie obrabiarek, pozwalające na stałe utrzymanie produkcji i realizację założonego harmonogramu. Unikanie awarii sprzętu i narzędzi, wcześniejsze planowanie czynności konserwacyjnych i naprawczych stają się w obecnej sytuacji rynkowej koniecznością i prawdziwym wyzwaniem dla konstruktorów obrabiarek CNC [3].

Wydaje się, że jedyną efektywną metodą uzyskania możliwie kompletnej informacji o bieżącym stanie procesu i maszyny jest stosowanie odpowiednich czujników. Pozwalają one na precyzyjne gromadzenie danych o istotnych parametrach i własnościach fizycznych, a także analizowanie wytypowanych miar sygnałów [4]. Jest to warunek konieczny rzeczywistego wprowadzenia idei przemysłu 4.0 w warunkach warsztatowych [5, 6].

Czujnik/sensor (łac. *sentire/sensum* – ten, który odczuwa) to element układu automatyki odpowiedzialny za two-

zenie sygnału niosącego informację o stanie monitorowanego procesu lub urządzenia [7]. Zadaniem czujników jest aktywne przetwarzanie wybranej wielkości fizycznej (jej zmian), najczęściej na wielkość elektryczną, łatwą do pomiaru i dalszego przetwarzania (przesyłania). Taką wielkością elektryczną jest np. napięcie, prąd lub częstotliwość. Czujniki stanowią pierwszy element toru pomiarowego. Pomiar jest rozumiany jako odwzorowanie obrazu rzeczywistości (procesu) w obraz abstrakcji (informację) będący wynikiem porównania mierzonej wielkości z przyjętym wzorcem [8].

Czujniki spotykane w technice pomiarowej dzieli się na:

- analogowe – przetwarzanie sygnału nie zmienia jego ciągłego charakteru, a wynik pomiaru jest prezentowany jako sygnał analogowy w funkcji czasu,
- cyfrowe – występuje proces dyskretyzacji i kwantowania ciągłego sygnału pomiarowego (przetwarzanie analogowo-cyfrowe), a wynik jest przedstawiany w postaci cyfrowej (dyskretnej).

Równie popularny jest podział sensorów na aktywne (wymagają dostarczenia energii w celu wytworzenia sygnału pomiarowego, np. termistor) i pasywne (energia sygnału jest pobierana z obserwowanego zjawiska, np. termopara).

W automatyce przemysłowej najczęściej wykorzystuje się sygnały napięciowe o zakresach:  $0 \div 10$  V,  $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V, cyfrowe: TTL oraz CMOS i prądowe:  $0 \div 20$  mA i  $4 \div 20$  mA. Można sformułować wiele kryteriów pomocnych przy doborze czujników. Jako podstawowe wymienia się: zawieranie przez czujnik przewidywanego przedziału zmian wartości wielkości mierzonej, wymagany/preferowany sposób dalszego wykorzystania sygnału pomiarowego, dopasowanie do charakterystyk statycznych (dokładność) i dynamicznych układu pomiarowego (transmitancja), spełnienie wymagań środowiskowych, minimalizowanie wpływu czujnika na proces lub stan obrabiarki, czułość, niewrażliwość na zakłócenia oraz niezawodność [9].

W przypadku automatyki przemysłowej czujniki służą zazwyczaj do pomiarów: położenia, prędkości liniowej i kątownej (obrotowej), przyspieszenia liniowego lub prędkości i przyspieszenia kątownego obiektu w jego własnym układzie odniesienia (akcelerometri i żyroskopu), siły, momentu siły, naprężenia, ciśnienia, odkształcenia, sztywności, masy, gęstości, lepkości, strumienia, środowiska (temperatury, wilgotności, ciśnienia, poziomu dźwięku), własności elektrycznych (np. napięcia, częstotliwości, natężenia prądu, mocy czynnej i biernej) itp. Ze względu na zasadę działania sensory można sklasyfikować jako: potencjometryczne, pojemnościowe, indukcyjne, ultradźwiękowe, tensometryczne, piezoelektryczne, piezorezystywne,

\* Dr inż. Piotr Szulewski, [maxter@cim.pw.edu.pl](mailto:maxter@cim.pw.edu.pl), [piotr.szulewski@pw.edu.pl](mailto:piotr.szulewski@pw.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0002-0821-3946> – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

Dr inż. Dominika Śniegulska-Grądzka, [dominika.gradzka@pw.edu.pl](mailto:dominika.gradzka@pw.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0001-6418-5938> – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

Dr inż. Mirosław Nejman, [m.nejman@zaoi.os.pw.edu.pl](mailto:m.nejman@zaoi.os.pw.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0003-4418-019X> – Instytut Technik Wytwarzania, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

fotoelektryczne, magnetoelektryczne itp. [10, 11]. Często potrzebą jest przetworzenie formy sygnału pomiarowego (kształtu lub przebiegu), tak aby uzyskać sygnał charakteryzujący się korzystniejszymi własnościami niż oryginalny przebieg z czujnika/sensora. Najczęściej przeprowadza się takie działania, jak: wzmocnienie, filtrowanie, prostowanie, modulacja, dyskretyzacja lub kodowanie [12].

Podczas tworzenia systemu pomiarowego, mającego na celu pozyskiwanie wartościowych informacji (monitorowanie) o stanie obrabiarki lub procesu obróbki, konieczne staje się przestrzeganie ogólnych zasad związanych z budową toru pomiarowego. Należy więc zadbać o:

- dopasowanie charakterystyk pomiarowych (statycznych oraz dynamicznych) wykorzystywanych podzespołów (np. zgodne i wystarczające zakresy pomiarowe – przedziały zmienności wielkości wyjściowej i wejściowej współpracujących elementów muszą być jednakowe),
- jak największe oporności obwodów pomiarowych, co zminimalizuje obciążanie mocą obserwowanych obiektów/układów,
- unikanie szkodliwych sprzężeń indukcyjnych i pojemnościowych pomiędzy czujnikami a przyrządami, mogących stanowić źródło niekorzystnych zjawisk pasożytniczych (szumów i harmonicznnych),
- ograniczenie pojawiania się i rozprzestrzeniania niepożądanego składowego stałej sygnałów zmiennych,
- uproszczenie układu pomiarowego (minimalizowanie liczby elementów składowych oraz obwodów w układzie) [13].

Podstawowe parametry techniczne charakteryzujące czujnik to:

- Zakres dynamiczny pomiaru jest oznaczany jako stosunek maksymalnej wartości wejściowej czujnika do minimalnej, ale jeszcze mierzalnej wartości sygnału wejściowego. Wartość zakresu dynamicznego jest zazwyczaj wyrażana w decybelach. Dla wielkości typu napięcie i prąd jest to wzór:

$$K_u [\text{dB}] = 20 \log_{10} \left[ \frac{U_2}{U_1} \right] \quad (1)$$

gdzie:  $K_u$  – stosunek napięć/amplitud;  $U_1$  – napięcie/amplituda odniesienia;  $U_2$  – napięcie/amplituda mierzona.

Przykładowo dla stosunku napięć 1  $\mu\text{V}/1 \text{ V}$  wartość  $K_u$  wyrazi się jako 120 dB. Dla stosunku mocy wzór przyjmuje postać:

$$P [\text{dB}] = 10 \log_{10} \left[ \frac{P_1}{P_0} \right] \quad (2)$$

gdzie:  $P_1$  – moc mierzona;  $P_0$  – moc odniesienia;  $P$  – stosunek mocy.

- Pod pojęciem rozdzielczości pomiaru należy rozumieć minimalną różnicę między dwiema wartościami, która jest wykrywana przez czujnik (oczywiście powyżej wartości szumów własnych). W przypadku czujników analogowych rozdzielczość odpowiada zazwyczaj dolnej granicy zakresu dynamicznego. Rozdzielczość czujników cyfrowych zależy od zakresu pomiarowego przetwornika A/C i liczby poziomów sygnału, które w tym zakresie może on zmierzyć (szerokości słowa danych – liczby bitów). Przykładowo: dla czujnika cyfrowego mierzącego napięcie w zakresie 0÷10 V z 12-bitowym przetwornikiem A/C rozdzielczość wynosi  $10 \text{ V} / 4095 \approx 2,4 \text{ mV}$ .

- Pasma częstotliwości – jest ograniczone szybkością reakcji czujnika na zmiany wartości wielkości mierzonej i określa maksymalną oraz minimalną wartość częstotliwości sygnału, jakie mogą być mierzone przez czujnik.

- Liniowość określa zależność między wejściem i wyjściem czujnika. Dla dwóch wejść  $x$  oraz  $y$  (przy odpowiednich wyjściach oznaczonych  $f(x)$  i  $f(y)$ ), dla dowolnych liczb  $A$  i  $B$  spełniona jest zależność:

$$f(Ax + By) = Af(x) + Bf(y) \quad (3)$$

- Jako czułość czujnika przyjmuje się stosunek zmiany sygnału wyjściowego do zmiany wielkości mierzonej. Czasami czułość określa się także jako nachylenie zależności sygnału wyjściowego od wejściowego.

### Inteligentne czujniki

Już od ponad dwóch dekad w obrabiarkach montuje się różnorodne czujniki i przetworniki. Jednym z najważniejszych (faktycznie pierwszym) ich zastosowań było zwiększenie ochrony zarówno maszyny, jak i procesu przed skutkami awarii, błędnego działania podzespołów lub kolizji. System sterowania wyposażony w odpowiednie czujniki (np. pomiaru położenia, siły) może w razie konieczności zareagować w ciągu zaledwie milisekund, czyli tysiąc razy szybciej niż wyszkolony operator. Jednak współcześnie, aby przedsiębiorstwo uzyskało przewagę na konkurencyjnym i globalnym rynku, musi oferować wytwarzanie bardzo szerokiego asortymentu produktów z możliwością ich pełnego personalizowania, elastyczność i jak najniższe koszty produkcji. Warunkiem osiągnięcia takiego stanu jest podjęcie niestandardowych działań skierowanych na maksymalne wykorzystanie posiadanego parku maszynowego [14]. Wiąże się to nierozdzielnie z potrzebą wprowadzenia pełnego monitorowania stanu wszystkich obrabiarek i realizowanego przez nie procesu. Umożliwia to natychmiastowe wykrywanie problemów oraz szybkie i skuteczne podejmowanie działań minimalizujących ich negatywne skutki [15].

Stały, efektywny rozwój informatyki i mikroelektroniki pozwolił na stworzenie zupełnie nowej klasy urządzeń wyposażonych w zaawansowane funkcje i realizujących skomplikowane algorytmy pomiaru. Coraz większą popularnością cieszą się inteligentne czujniki (*intelligent sensor*, *smart sensor*) zawierające element pomiarowy (najczęściej półprzewodnikowy) ze specjalnymi obwodami elektronicznymi. Pierwsze przykłady tego typu urządzeń pojawiły się pod koniec lat 80. ubiegłego wieku i od tej pory nieustannie ewoluują. Obecnie stały się bardzo skomplikowanymi podzespołami o szerokich możliwościach pomiarowych oraz funkcjonalnych [16]. Na podstawie możliwości podejmowania przez czujnik zaawansowanych działań urządzenia te dzieli się na:

- czujniki zwykłe – które przetwarzają fizyczną wielkość mierzona na wielkość elektryczną (np.: siłę elektromotoryczną SEM, ładunek, zmianę rezystancji),
- czujniki zintegrowane – z wbudowanymi elementami przetwarzającymi (np.: wzmacniaczami, filtrami, kondyjonierami, przetwornikami A/C),
- czujniki inteligentne – w ich strukturze występują układy programowalne i mikrokontrolery pozwalające na zaawansowaną obróbkę sygnału i zapewniające komunikację z systemami nadrzędnymi.

Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy struktury współczesnego inteligentnego czujnika.

Czujniki te – dzięki dodatkowym układom i oprogramowaniu (inteligencji) – pozwalają na skuteczne wyekstrahowanie najbardziej wartościowych informacji uzyskanych podczas pomiaru. Dane te są szybko i dokładnie opracowywane lokalnie i bezpiecznie przesyłane do odbiorców.



Fig. 1. Block diagram of the intelligent sensor  
Rys. 1. Schemat blokowy inteligentnego czujnika

Rozbudowana funkcjonalność komunikacyjna pozwala na znaczne uproszczenie struktury systemu pomiarowego [17, 18]. Najważniejsze funkcje realizowane przez inteligentne czujniki to:

- skuteczna, programowa linearyzacja (kompensacja) charakterystyki pomiarowej użytego przetwornika, co zwiększa dokładność pomiaru i eliminuje wpływ czynników pobocznych (temperatury, ciśnienia),
- autokalibracja, samoczynne zerowanie, justowanie, porównywanie z przyjętym wzorcem,
- automatyczne dostosowanie zakresu pomiarowego do warunków pomiaru i mierzonej wielkości,
- rejestracja i przechowywanie danych w przypadku utraty łączności z systemem nadrzędnym,
- kompresja danych i wstępna statystyka otrzymanych wyników,
- pełna autodiagnostyka (autotest) stanu czujnika (np. dryft temperaturowy), detekcja błędów
- dążenie do stanu samonaprawialności,
- wymiana danych za pomocą zdefiniowanego protokołu,
- sterowanie pracą (parametrami, trybami itd.) poszczególnych podzespołów (np. przetworników, wzmacniaczy),
- zdolność do samouczenia się oraz samodzielne wnioskowanie,
- współpraca z innymi czujnikami w grupach lub rojach.

Inteligentne czujniki stanowią podstawę popularnego systemu internetu rzeczy (*Internet of Things*) i jego przemysłowej wersji – *IIoT (Industrial Internet of Things)*. Należy mieć na uwadze, że główną cechą odróżniającą urządzenia przemysłowe od konsumpcyjnych jest bezawaryjność i stosunkowo długi czas użycia. Przyjmuje się, że średni czas poprawnego funkcjonowania urządzenia przemysłowego oscyluje w przedziale 7÷10 lat [19]. Prognozowany sukces *IIoT*, jak się wydaje, będzie możliwy jedynie w przypadku tworzenia środowisk rozwiązujących rzeczywiste problemy. Zadania stojące przed tego typu systemami można podzielić na trzy główne kategorie:

- techniczne: miniaturyzacja, większa moc obliczeniowa, mniejsze zużycie energii, otwartość komunikacji,
- algorytmiczne: bardziej zaawansowane algorytmy przetwarzania danych zogniskowane na specyficznym, konkretnym zadaniu/aplikacji,
- kompletności: gotowość do wykonywania praktycznej pracy zaraz po dołączeniu zasilania [20].

Struktura informacyjna internetu rzeczy składa się z kilku poziomów ułożonych hierarchicznie, które (w typowej aplikacji) można określić jako etapy działania sztucznej inteligencji. I tak, odpowiednio: surowe dane pomiarowe, poddawane analizie i przetwarzaniu, pozwalają na wykrywanie zmian mierzonej wielkości, dają możliwość pełnego monitorowania aktualnego stanu urządzenia i umożliwiają wprowadzanie świadomości kontekstowej (wiedzy) o sposobie pracy urządzenia (wzorcach zachowań w funkcji czasu) poprzez wykrywanie przyczyn zmian stanu, a w rezultacie predykcynie wnioskują o przyszłym stanie i zachowaniu się maszyny. Tego typu działania wy-

dają się bardzo atrakcyjne, gdyż w przypadku ich sukcesu pozwolą na wyeliminowanie sytuacji awaryjnych i zapewnią pełną ciągłość produkcji z zachowaniem najwyższej osiągalnej jakości i akceptowalnego kosztu wytworzenia. Obecnie prowadzi się badania nad wprowadzeniem sposobów pracy tych systemów zgodnych z funkcjami ludzkiego mózgu – jako najbardziej wyrafinowanymi mechanizmami kojarzenia, wnioskowania i planowania [21]. Na rys. 2 przedstawiono egzemplifikację tej koncepcji.

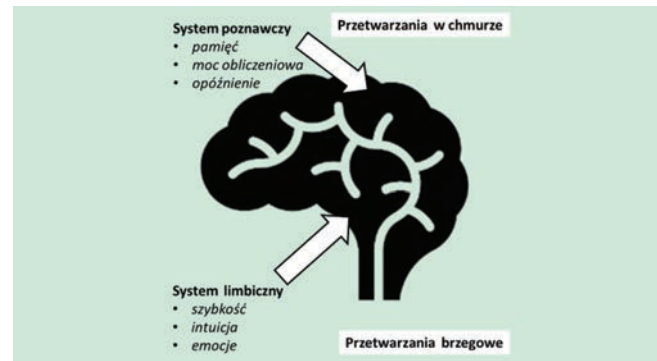


Fig. 2. Two basic ways of data processing  
Rys. 2. Dwa podstawowe sposoby przetwarzania danych

Zgodnie z ustalonymi poglądami mózg istoty rozumnej ma dwa podstawowe systemy przetwarzania danych (rys. 2): poznawczy i limbiczny.

W trybie poznawczym przetwarzane są bardzo duże ilości danych w stosunkowo znacznych okresach czasu – występuje zmienne opóźnienie, jednak wyniki są oparte na dogłębnej analizie i mogą stanowić stabilną podstawę do dalszego działania. Przyrównując ten model do reprezentacji technicznej, można go skojarzyć ze współczesnym przetwarzaniem w chmurze (pamięć, moc obliczeniowa, latencja). Jego przeciwieństwem jest układ limbiczny (układ brzożny), traktowany jako pierwotny, reaktywny i refleksyjny, odpowiedzialny za regulację zachowań emocjonalnych. W technice jego odpowiednikiem jest miejscowe przetwarzanie brzegowe, realizowane bezpośrednio w obszarze czujników [22].

Wynika stąd bardzo istotna funkcja, jaką muszą mieć inteligentne czujniki. Jest ona związana z koniecznością podejmowania autonomicznych decyzji – np.: które z pozyskanych danych są na tyle istotne, by je przenieść do chmury obliczeniowej (gdzie zostaną poddane szczegółowej analizie), a które informacje powinny zostać przetworzone lokalnie w czujniku [23]. Takie działanie pozwala na bardzo efektywne wykorzystanie dostępnej przepustowości sieci i mocy obliczeniowej, a jednocześnie nie obniża jakości pozyskiwanej wiedzy i precyzji monitorowania maszyny lub procesu. Skuteczne i efektywne algorytmy decyzyjne, zbliżone do intuicyjnego określania kryteriów weryfikacji danych, stanowią podstawę tego procesu [24].

### Przykładowe rozwiązania

Zgodnie z tym, co zostało już opisane, wszystkie działania producentów elementów, podzespołów i zespołów automatyki przemysłowej zmierzają do zapewnienia jak największej wydajności procesowej maszyn. Poszukują oni rozwiązań systemowych charakteryzujących się przejrzystością, wydajnością oraz ciągłą komunikacją, począwszy od pojedynczych czujników, aż po całe grupy urządzeń działających w liniach produkcyjnych oraz halach. Dążą się do optymalizacji, redukcji kosztów oraz nieustannego monitorowania produkcji.



### Kontrolowanie procesu obróbki skrawaniem

Aby mierzyć zjawiska fizyczne pochodzące od procesu skrawania, czujniki powinny się umieszczać jak najbliżej strefy skrawania. W warunkach produkcyjnych ograniczeniem dla instalacji czujników jest stopień skomplikowania mechanizmów obrabiarek (doprowadzenie zasilania do czujników i wyprowadzenie sygnałów pomiarowych, hermetyczność złącz czujnik-przewód, odporność przewodów i czujnika na agresywne chemicznie chłodziwo oraz ostre wióry, które szybko potrafią przeciąć nawet metalowe, zbrojone osłony przewodów). Z tych powodów niezwykle cenna jest każda innowacja w dziedzinie dostosowania czujników do pomiarów blisko strefy skrawania.

Przykładem może tu być aktywny tłumik drgań do narzędzi tokarskich Silent Tools™ firmy Sandvik (rys. 3), w który wbudowano czujnik pozwalający na kontrolę kąta pochylenia krawędzi skrawającej narzędzia i ustawienia ostrza na poziomie osi obrotu. Oprawkę narzędziową wyposażono w systemy pomiarowe komunikujące się z oprogramowaniem do sterowania i wizualizacji pracy narzędzia przez łącze Bluetooth i umożliwiające wizualizację mierzonych danych w czasie rzeczywistym:

- kontaktu narzędzia z materiałem obrabianym i temperatury modułu tłumienia drgań,
- poziomu chropowatości powierzchni i drgań,
- obciążenia i ugięcia.



Fig. 3. Active vibration damper for turning tools [25]

Rys. 3. Aktywny tłumik drgań do narzędzi tokarskich [25]

Kolejnym przykładem jest głowica do napędzania narzędzi obrotowych do zastosowania w tokarkach Coromant Capto® DTH Plus (rys. 4). Wbudowane czujniki pozwalają na samodiagnozę pod kątem planowanych konserwacji głowicy i wykrywanie nadmiernego zużycia narzędzia. W czasie rzeczywistym jest dostęp do takich informacji, jak: pozostały szacunkowy czas eksploatacji, poziom naładowania akumulatora, poziom drgań z obróbki, prędkość obrotowa i kierunek obrotów oraz temperatura pracy głowicy.



Fig. 4. Driven tool holder [26]

Rys. 4. Głowica do napędzania narzędzi obrotowych [26]

### Bezprzewodowa transmisja danych z ruchomych i obrotowych części obrabiarek

Częstym problemem monitorowania ruchomych i obrotowych części maszyn jest brak możliwości przewodowego doprowadzenia napięcia zasilania do czujnika i transmisja przewodem sygnału pomiarowego z oraz do czujnika. W ofercie firmy PCB Electronics znajdują się uniwersalne systemy telemetryczne, które mogą być zasilane bateryjnie albo z wykorzystaniem transmisji RF (*radio frequency*). Takie rozwiązanie jest właściwie bezobsługowe w porównaniu z systemami wymagającymi prowadzenia przewodów (które przemieszczają się lub zginają) albo wykorzystującymi szczotki (zestyki) w transmisji sygnałów. System PCB z serii 8179 i 8180 (rys. 5) ma kompaktowy rozmiar, masę od 4 g, jest odporny na wstrząsy, zabrudzenia, wodoodporny i umożliwia bezprzewodową kalibrację. Obsługuje tensometry, termopary, termorezystory lub zapewnia pomiar napięcia.



Fig. 5. Single channel telemetry system PCB Electronics 8180-RE110A [27]

Rys. 5. Jednokanałowy system telemetryczny PCB Electronics 8180-RE110A [27]

Dostępne są również systemy pomiarowe do pomiaru sił skrawania i momentów. Przykładem może być dynamometr spike firmy pro-micron (rys. 7) lub dynamometr obrotowy firmy Kistler 9170A (rys. 6). W obu rozwiązaniach sygnał z czujnika wyprowadzany jest radiowo, co umożliwia dokonywanie pomiarów sił bardzo blisko strefy skrawania. Problematyczne jest przezbrajanie czujnika w kolejne frezy lub wiertła. Jeśli proces produkcyjny przewiduje użycie wielu narzędzi, to posiadanie wielu takich siłomierzy (osobnego siłomierza dla każdego narzędzia) jest bardzo kosztowne. Również nieopłacalne (ze względu na przestoje w pracy) jest mocowanie kolejnych narzędzi w tym samym siłomierzu w czasie pojedynczej operacji.



Fig. 6. Rotating dynamometer Kistler 9170A [28]  
Rys. 6. Dynamometr obrotowy firmy Kistler 9170A [28]

Fig. 7. Spike dynamometer from pro-micron GmbH [29]  
Rys. 7. Dynamometr spike firmy pro-micron GmbH [29]



### Bezстыkowe badanie dokładności ruchu obrabiarek

EASY-LASER E940 Machine Tool (rys. 8) to system pomiarowy do badania dokładności ruchów obrabiarek. System jest uniwersalny i może służyć do testowania tokarek, frezarek, automatycznych wiertarek, pras, maszyn do cięcia wodą itp. Jego zastosowanie obejmuje m.in.: badania prostoliniowości osi maszyny, rzeczywistego położenia wrzeciona, pochylenia osi wrzeciona, prostokątności pomiędzy osiami obrabiarki, płaskości stołu lub łoża obrabiarki oraz kontrolę luzu łożysk. Całkowicie zastępuje tradycyjne metody z użyciem sond dotykowych czy czujników zegarowych. Cyfrowa archiwizacja danych pozwala na szybkie wygenerowanie danych do kompensacji ruchów maszyny, jeśli ta nie zapewnia ruchów prostoliniowych.

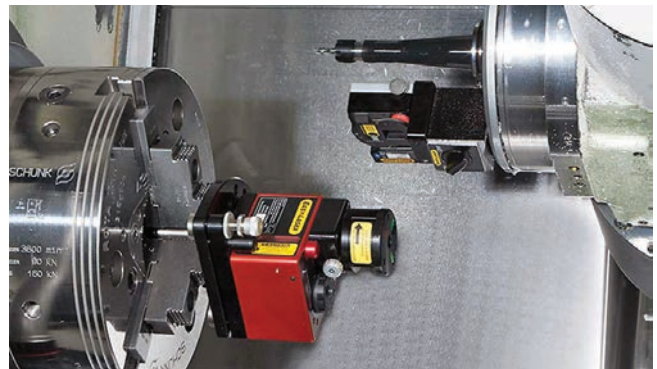


Fig. 8. EASY-LASER E940 Machine Tool measuring system [30]  
Rys. 8. System pomiarowy EASY-LASER E940 Machine Tool [30]

### Monitorowanie stanu łożysk

Innowacyjnym rozwiązaniem monitorowania łożysk jest czujnik zabudowany w łożysku FAG z modulem VarioSense, który może monitorować: prędkość obrotową, temperaturę, przemieszczenie, kąt obrotu, kierunek obrotów, obciążenie oraz drgania/przyspieszenie (rys. 9). Można nim zastąpić dotychczasowe łożysko, o ile w kierunku osiowym jest miejsce na dodatkowe 7 mm. Z odpowiednim modulem firmy Schaeffler (producenta łożyska) można także monitorować zużycie łożyska.



Fig. 9. FAG VarioSense bearing [31]  
Rys. 9. Łożysko FAG VarioSense [31]

### Rozproszona sieć czujników z interfejsem IO-Link

System IO-Link – niezależny od producentów system komunikacji typu punkt–punkt (IEC 61131-9) – umożliwia dołączanie różnego typu czujników i układów wykonawczych (*actuators*) do systemu automatyzacji. Składa się z urządzenia Master IO-Link, które jest interfejsem do układu sterowania lub poziomu magistrali obiektowej. Komunikuje się ono z jednym lub wieloma urządzeniami IO-Link, mogącymi korzystać ze standardów sieci Profinet, Profibus, EtherCAT, CC-Link, EtherNet/IP czy DeviceNet. IO-Link to międzynarodowy standard współdziałający ze wszystkimi powszechnie stosowanymi magistralami obiektowymi i układami sterowania. Stosowany jest przez takich producentów, jak ifm, Balluff, Turck czy Sick. Umożliwia niezawodną transmisję sygnałów z czujników binarnych, wartości procesowych czujników analogowych oraz ich parametrów w cyfrowej formie i na bazie sygnału 24 V. Obecnie czujniki IO-Link oferują całkowicie nowe możliwości, zgodnie z kierunkiem rozwoju przemysłu 4.0. Przykładowo: generowane są dodatkowe dane czujników, które można wykorzystać do zapewnienia maksymalnej efektywności i oszczędności procesów oraz występuje transparentność procesu od maszyny do systemu ERP, co pozwala na maksymalną optymalizację istniejącego systemu automatyki przemysłowej. Czujniki z IO-Link charakteryzuje również:

- odporność na zakłócenia – dzięki bezpośredniemu przesyłaniu sygnału cyfrowego wartości mierzone nie tracą na dokładności oraz nie są podatne na zakłócenia w trakcie transmisji do układu sterowania, jak to ma miejsce w przypadku sygnałów analogowych (rys. 10a); przewody do przesyłania danych cyfrowych (rys. 10b) nie wymagają uziemienia i sygnał nie jest wrażliwy na zakłócenia, jak w przypadku przewodów pomiarowych z sygnałami analogowymi, które muszą być ekranowane, uziemiane; w czujnikach z wyjściem cyfrowym z reguły opcjonalne jest wyjście analogowe i wtedy występuje wielokrotna konwersja postaci cyfrowej na analogową, co razem ze stratą przesyłania analogowego może powodować błędy pomiaru sięgające 1% lub więcej; na rys. 11 pokazano przykład czujnika ciśnienia z interfejsem IO-Link, firmy ifm;

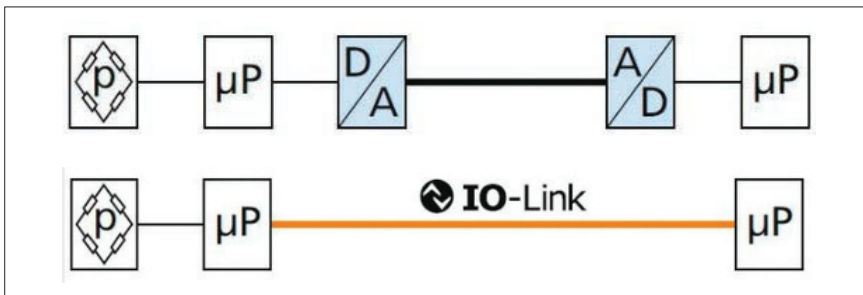


Fig. 10. IO-Link sensor measuring path: a) analog transmission, b) digital transmission [32]

Rys. 10. Tor pomiarowy czujnika IO-Link: a) przesyłanie analogowe, b) przesyłanie cyfrowe [32]



Fig. 11. Pressure sensor with display PN016A [33]

Rys. 11. Czujnik ciśnienia z wyświetlaczem PN016A [33]



- równoległe przesyłanie wielu wartości – czujniki IO-Link mogą zawierać w obudowie kilka przetworników i przesyłać wiele danych równoległe, na co pozwala standard komunikacji (na rys. 12 przedstawiono przykład czujnika do monitorowania procesu, służącego do pomiaru przepływu i temperatury, oraz licznika ilości całkowitej w jednym zintegrowanym czujniku, przesyłającym dane jednym trzyżyłowym przewodem; pozwala on na dokładny pomiar przepływu, poboru oraz temperatury medium, charakteryzuje się dużą dokładnością, powtarzalnością i dynamiką pomiaru, ma wyjścia przełączające, analogowe i impulsowe; czujnik SM9000 z konfigurowalnym IO-Link jest klasyfikowany przez producenta jako *smart sensor*);

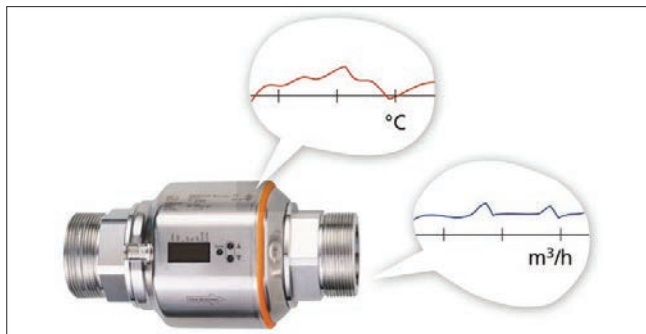


Fig. 12. Electromagnetic flow meter SM9000 [34]

Rys. 12. Przepływomierz elektromagnetyczny SM9000 [34]

- szybkie zastępowanie czujników – moduł Master IO-Link zapisuje pełną konfigurację wraz z parametrami podłączonych czujników, dzięki czemu w razie wymiany czujnika poprzednie parametry są automatycznie wczytywane do nowego czujnika;
- bezpieczeństwo – blokowanie poprzez sieć IO-Link zmiany parametrów przez osoby nieupoważnione – konfigurując czujnik, można poprzez standardową parametryzację zablokować przyciski kontrolne, aby zapobiegać nieprawidłowemu ustawieniu czujnika przez personel obsługujący; w dowolnym czasie można zweryfikować dokumentację parametrów;
- identyfikacja – czujniki obsługujące IO-Link są jednoznacznie identyfikowane za pomocą Vendor ID oraz Device ID – zapewnia to stosowanie wyłącznie oryginalnych części zamiennych.

System IO-Link umożliwia przesyłanie nie tylko danych z procesu, lecz także danych diagnostycznych (np. o przerwaniu przewodu lub zwarciu), które można swobodnie monitorować podczas ciągłej pracy.

## Podsumowanie

Z przedstawionych przykładów wynika, że należy się spodziewać postępujących zmian w zakresie czujników i systemów pomiarowych. Zmiany te będą ukierunkowane na wzrost samodzielności i autonomii układów pomiarowych zgodnie z koncepcją przetwarzania krawędziowego. Konieczne będą zwiększanie mocy obliczeniowej mikrokontrolerów obsługujących czujniki i implementacja coraz bardziej zaawansowanych (przekształcalnych/adaptacyjnych/samodoskonalących się) algorytmów. Rozbudowywana będzie także funkcjonalność komunikacyjna, ułatwiająca współpracę (wymianę danych) ze środowiskami chmurowymi. Wszystkie te zmiany będą wymagać modyfikacji, a właściwie nowego podejścia do tworzenia nowoczesnych architektur pomiarowych i – jak się wydaje – całkowitej zmiany dotychczasowej koncepcji/strategii systemów monitorowania oraz nadzoru.

## LITERATURA

- [1] Villalonga A. et al. "Condition-based Monitoring Architecture for CNC Machine Tools based on Global Knowledge". *IFAC-PapersOnLine*. 51, 11 (2018): 200–204, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.259>.
- [2] Tao W., Jiang Y. "Research on Intelligent Information Acquisition and Monitoring Method of NC Machine Tool Processing". *Proceedings of the 2019. 3<sup>rd</sup> International Forum on Environment, Materials and Energy (IFEME 2019)*, <https://doi.org/10.1016/j.ifeme-19.2019.96>.
- [3] Luo B. et al. "Early Fault Detection of Machine Tools Based on Deep Learning and Dynamic Identification". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 66, 1 (January 2019): 509–518, <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2807414>.
- [4] Śniegulska-Grądzka D., Nejman M., Szulewski P. "Aktywne systemy monitorowania procesu skrawania dla Industry 4.0". *Mechanik*. 3 (2018): 183–189, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.3.34>.
- [5] Zheng P. et al. "Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives". *Frontiers of Mechanical Engineering*. 13, 2 (June 2018): 137–150, <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>.
- [6] Szulewski P. "Oprogramowanie i systemy czujników fundamentem koncepcji przemysłu 4.0". *Mechanik*. 5–6 (2019): 346–352, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.5-6.40>.
- [7] Ambhorea N. et al. "Tool Condition Monitoring System: A Review". *Materials Today Proceedings*. 2, 4–5 (2015): 3419–3428, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.317>.
- [8] Chung K.T., Geddam A. "A multi-sensor approach to the monitoring of end milling operations". *Elsevier Journal of Materials Processing Technology*. 139, 1–3 (20 August 2003): 15–20, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00175-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00175-4).
- [9] Groover M.P. "Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing". 3<sup>rd</sup> edition. NJ, USA: Prentice Hall Press Upper Saddle River, 2007, ISBN: 0132393212.
- [10] Solomon S., "Sensors Handbook". NJ, USA: McGraw-Hill, Inc., 2009, ISBN: 0071605703 9780071605700.
- [11] Fortuna L. et al., "Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes". Springer Science & Business Media. 271 (31 may 2007): 167–182.
- [12] Villalonga A. et al. "Industrial cyber-physical system for condition-based monitoring in manufacturing processes". *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. 2018, <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390780>.
- [13] Civerchia F. et al. "Industrial Internet of Things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications". *Journal of Industrial Information Integration*. 7 (September 2017): 4–12, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.02.003>.
- [14] Sandeep P., Kumar M. "The Process Model for Shop Floor Management Implementation". *International Journal of Engineering Science and Computing*. (April 2017): 10775–10779, <https://doi.org/10.7508/AIEM-V2-N1-40-46>.
- [15] Szulewski P. "Efektywne łączenie systemów podstawą inteligentnej produkcji". *Mechanik*. 1 (2018): 7–11, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.1.1>.
- [16] Yamasaki H. "What are the intelligent sensors". *Handbook of Sensors and Actuators*. Elsevier. 3 (1996), [https://doi.org/10.1016/S1386-2766\(96\)80026-0](https://doi.org/10.1016/S1386-2766(96)80026-0), 1–17.
- [17] Brecher C. et al. "The need of dynamic and adaptive data models for cyber-physical production systems". *Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications* (H. Song, D. Rawat, S. Jeschke, C. Brecher ed.). Academic Press, 2017, 321–338.
- [18] Morris A.S., Langari R. "Measurement and Instrumentation (Second Ed.) Theory and Application". Chapter 10, Academic Press, 2016, 289–314, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800884-3.00010-1>.
- [19] Wan J. et al. "Software-defined Industrial Internet of Things in the context of Industry 4.0". *IEEE Sensors Journal*. 16, 20 (October 15, 2016): 7373–7380, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2565621>.
- [20] Barnaghi P. et al. "Semantics for the Internet of Things: Early progress and back to the future". *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*. 8, 1 (2012): 1–21.
- [21] Vural Özdemir V., Hekim N. "Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence. The Internet of Things and Next-Generation Technology Policy". Online: 1 Jan 2018, <https://doi.org/10.1089/omi.2017.0194>.
- [22] Lu H. et al. "Brain Intelligence: Go beyond Artificial Intelligence". *Mobile Networks and Applications*. 23, 2 (April 2018): 368–375.
- [23] Pankesh P. et al., "On using the Intelligent Edge for IoT analytics". *IEEE Intelligent Systems*. 32, 5 (September/October 2017), 64–69, <https://doi.org/10.1109/MIS.2017.3711653>.
- [24] Daniel E.O. "Artificial Intelligence and Big Data". *IEEE Intelligent Systems*. 28 (February 2013): 96–99, <https://doi.org/10.1109/MIS.2013.39>.
- [25] [https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/products/silent\\_tools\\_turning/Pages/silent-tools-plus.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/products/silent_tools_turning/Pages/silent-tools-plus.aspx) (dostęp: 29.01.2019).
- [26] [https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/products/coromant\\_capto/Pages/coromant-capto-plus.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/products/coromant_capto/Pages/coromant-capto-plus.aspx) (dostęp: 24.01.2019).
- [27] [https://www.pcb.com/spec\\_sheet.asp?m=8180-RE110A](https://www.pcb.com/spec_sheet.asp?m=8180-RE110A) (dostęp: 29.01.2019).
- [28] <https://www.kistler.com/en/applications/sensor-technology/cutting-force-measurement/rcd-rotating-dynamometers-to-measure-cutting-forces> (dostęp: 29.01.2019).
- [29] [https://www.pro-micron.de/wp-content/uploads/2018/10/V25\\_spike\\_Flyer\\_EN\\_final.pdf](https://www.pro-micron.de/wp-content/uploads/2018/10/V25_spike_Flyer_EN_final.pdf) (dostęp: 23.01.2019).
- [30] <https://easylaser.com/en-us/products/geometric-measurement/e940-machine-tool> (dostęp: 22.01.2019).
- [31] [https://www.schaeffler.pl/content/schaeffler.pl/pl/Produkty-i-Rozwiazania/Przemysl/portfolio\\_produktoiw/mechatronika/lozyska\\_fag\\_variosense/index.jsp](https://www.schaeffler.pl/content/schaeffler.pl/pl/Produkty-i-Rozwiazania/Przemysl/portfolio_produktoiw/mechatronika/lozyska_fag_variosense/index.jsp) (dostęp: 27.01.2019).
- [32] <https://www.ifm.com/pl/pl/shared/technologien/io-link/vorteile/przewaga-dzi%C4%99ki-io-link> (dostęp: 22.01.2019).
- [33] <https://www.ifm.com/pl/pl/product/PN016A> (dostęp: 22.01.2019).
- [34] <https://www.ifm.com/pl/pl/product/SM9000> (dostęp: 22.01.2019).