

Jakub TYRTANIA¹

Opiekun naukowy: Paweł ZIOBRO², Dorota WIĘCEK³

ZASTOSOWANIE SYSTEMÓW MONITOROWANIA DRGAŃ W PRZEMYSŁE 4.0

Streszczenie: Artykuł przedstawia zagadnienia związane z systemami monitorowania wibracji w obrabiarkach, które mają obecnie coraz większe zastosowanie w przemyśle. Celem jest zdefiniowanie systemu monitorowania drgań, który odpowiednio wykorzystany pozwoli na określenie stanu maszyny oraz podjęcie odpowiednich działań w kryzysowych momentach. Tworzenie zautomatyzowanych systemów kontroli maszyn stwarza duże szanse dla przedsiębiorstw poprzez budowanie wizerunku Cyfrowej Fabryki na rynku

Słowa kluczowe: system monitorowania drgań, Przemysł 4.0, Cyfrowe Przedsiębiorstwo

APPLICATION OF VIBRATION MONITORING SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0

Abstract: The article presents issues related to vibration monitoring systems in machine tools, which are currently increasingly used in industry. The goal is to define a vibration monitoring system that, when properly used, will allow the machine condition to be determined and appropriate action taken at critical times. The creation of automated machine control systems creates great opportunities for enterprises by building the image of Digital Factory on the market.

Keywords: vibration monitoring system, Industry 4.0, Digital Factory

1. Wprowadzenie

Nie ulega wątpliwości, że automatyzacja jest przyszłością przemysłu, w dobie coraz bardziej złożonych procesów produkcyjnych w przedsiębiorstwach. Powoduje to, że wprowadza się najnowocześniejsze oraz najbardziej efektywne systemy

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Zarządzanie i inżynieria produkcji, specjalność: Inżynieria Innowacji Przemysłowych, email: tyrtaniaj@gmail.com

² ZPT, email: pawel.ziobro@zp-team.pl

³ dr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: dwiecek@ath.bielsko.pl

sterowania i zarządzania procesami produkcyjnymi odbywającymi się w tych przedsiębiorstwach. Dążąc do uzyskiwania pełnej automatyzacji w przemyśle, przedsiębiorcy kierują się nie tylko czynnikami wydajności i szybkości realizacji zleceń, ale również skuteczniejszą kontrolą, dzięki zaimplementowaniu najnowszych technologii (np. czujników pomiarowych) w komponenty maszyn przemysłowych. Ma to duże znaczenie ze względu na produkt finalny danego procesu produkcyjnego, który musi być nie tylko konkurencyjny, ale także być gwarantem najwyższej jakości i bezpieczeństwa.[6]

Kluczem do uzyskania powyższych efektów staje się dominujący w coraz większym stopniu trend Przemysłu 4.0. Najprostszym przykładem jest bezpośrednie zbieranie danych z hali produkcyjnej, gdzie zostaną przeanalizowane przez zaawansowane narzędzia, takie jak Chmura obliczeniowa (ang. Cloud Computing) czy Zbiory danych (ang. BigData Analytics), co pozwoli na wykrycie i sposoby rozwiązywania niedostrzegalnych dotąd problemów, np.: zmęczenie materiału, zużycie narzędzia, maszyny czy optymalizację wykorzystania procesów wytwórczych.[2] Innym z aspektów czwartej rewolucji przemysłowej są systemy CPS oznaczające systemy produkcyjne zawierające ogromną ilość wbudowanych czujników i sensorów, a także wdrożonego oprogramowania do zbierania, analizowania i przechowywania informacji.[3]

W oparciu o tzw. systemy cyber-fizyczne (CPS) oraz Przemysłowy Internet Rzeczy (IIoT) powstała koncepcja nowoczesnej, inteligentnej fabryki – Smart Factory. Przez wielu naukowców nazywana fabryka przyszłości ma się wyróżniać przede wszystkim pełną autonomią w każdej fazie procesu produkcyjnego począwszy od planowania wyrobu, procesu, poprzez kolejne procesy, zasadniczą produkcję dochodząc do jego końca wraz z jej utrzymaniem. [1]

Wdrażając w zakładzie IIoT, jako kluczowy element Przemysłu 4.0, przedsiębiorstwa stawiają na rozwój digitalizacji zakładów. Mogą to uczynić głównie za pomocą systemów monitorowania zasadniczych parametrów procesu. Wprowadzanie systemów monitorowania pracy maszyny za pomocą drgań pozwala otrzymywać precyzyjne informacje o stanie całości złożonego systemu obróbczego.[8] W kontekście rewolucji przemysłowych oraz systemu utrzymania ruchu w oparciu o konserwację profilaktyczną można wymieniać narzędzie w najbardziej optymalnym momencie jego zużycia, maksymalizując czas jego pracy, minimalizując możliwość awarii spowodowaną niespodziewanym zdarzeniem.[4]

Otrzymywanie informacji wynikającej z ciągłej obserwacji narzędzia obróbczego dla zakładu jest bardzo pożądane i skutkuje oszczędnością finansową, technologiczną oraz organizacyjną. Wprowadzanie zmian eliminuje szeroko pojęte marnotrawstwo, które może mieć postać czasu, narzędzi, finansów, energii czy komponentów. Przykładem narzędzia mogącego się znacząco przyczynić do tworzenia Cyfrowej Fabryki jest system monitorowania wibracji w obrabiarkach, za pomocą którego można z uzyskanego widma drgań pracującej maszyny ocenić stan rzeczywisty obrabiarki.

2. System monitorowania drgań – zasady działania

Kluczowym zadaniem systemu monitorowania drgań jest obserwacja i analiza stanu technicznego maszyny. Ma na celu zapewnienie skutecznego sposobu analizy

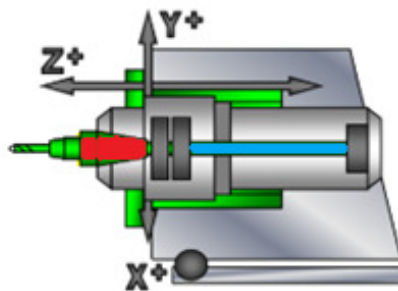
automatycznego wrzeciona obrabiarki, prowadnic poprzecznych, łożysk oraz osi, których badanie jest dokonywane w trybie ciągłym, a ich ewolucja i zmiany w czasie prezentowane są na pulpicie operatora. Priorytetowym celem jest zapewnienie ciągłej kontroli narzędzia, poprzez obserwację i pomiar drgań, aby w pełni wykorzystać komponenty obrabiarki, ale także zaplanować konieczne prace konserwacyjne czy remontowe. Wraz z zastosowaniem urządzenia można zaoszczędzić czas i koszty, które pochłaniają nieprzewidziane i nagłe awarie.[4]

Czujnik przyspieszenia drgań na wrzecionie uzyskuje pozornie złożony i nieuporządkowany przebieg drgań. Wewnętrzny algorytm systemu może przetwarzać sygnały i uzyskiwać amplitudę drgań różnych elementów mechanicznych, aby ocenić stan ich wydajności. Zastosowanie urządzenia pozwala zmniejszyć koszty utrzymania stanowiska pracy. System monitorowania wibracji potrafi w przypadku analizy wrzeciona skontrolować jego zamocowanie i zrównoważenie (na rys.1. zaznaczono kolorem czerwonym), dokonać analizy geometrii trzpienia wrzeciona (na rys.1. zaznaczono kolorem niebieskim) czy określić brak współosiowości. Zamocowany na końcu wrzeciona pozwoli również na nagrywanie i przechowywanie danych wibracyjnych, które są związane z obecnym stanem obrabiarki lub mającym miejsce kilka miesięcy wcześniej, a także z jakością odbywającego się procesu.[7]

Monitorowanie wrzeciona odbywa się poprzez śledzenie ewolucji następujących środków:[5]

- wartość skuteczną drgań wrzeciona (w mm /s) w kierunku promieniowym, gdy wrzeciono obraca się z małą prędkością,
- współczynnik zmęczenia Kurtozy drgań promieniowych, gdy wrzeciono obraca się z dużą prędkością,
- wartość skuteczną przyspieszenia wrzeciona (w m /s²) w promieniowym, gdy wrzeciono obraca się z dużą prędkością,
- wartość skuteczną drgań wrzeciona (w mm /s) w kierunku osiowym, gdy wrzeciono obraca się z małą prędkością,
- wartość szczytowa przy częstotliwości podstawowej wrzeciona do monitorowania równowagi (w mm /s),
- wartość szczytowa przy częstotliwościach harmonicznym wrzeciona do monitorowania geometrii wału (w mm /s).

Rysunek 1. prezentuje wrzeciono, które jest kontrolowane i analizowane przez czujnik.



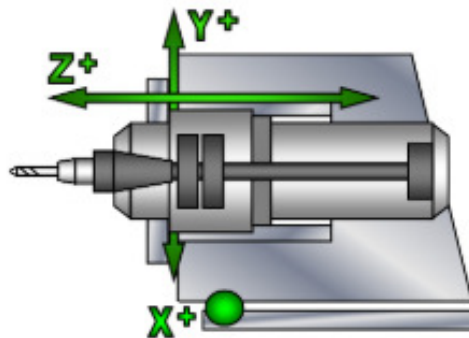
Rysunek 1. Kontrola elementów wrzeciona przez czujnik [5]

Warto zauważyć, że system można zainstalować na różnego rodzaju maszynach produkcyjnych: centrach tokarskich, centrach obróbczych czy szlifierkach. Ma ono szerokie zastosowanie, dlatego może zwiększyć produktywność w wielu przedsiębiorstwach produkcyjnych. Dobrze sprawdzi się w przypadku analizy śrub kulkowych lub ślizgów, ponieważ dostarczy wielu informacji o ruchomych częściach maszyn oraz określi zużycie osi toru i różnego rodzaju anomalie.[5]

Monitorowanie osi maszyny (rys.2) odbywa się poprzez śledzenie ewolucji następujących pomiarów każdej osi:[5]

- szczytową wartość przyspieszenia, gdy oś porusza się po całym skoku (wykrywanie uszkodzenia miejscowego),
- wartość skuteczną przyspieszenia, gdy oś porusza się po całym skoku (wykrywanie zużycia),
- wartość współczynnika szczytowego przyspieszenia, gdy oś porusza się po całym skoku (wykrycie uszkodzenia).

Duże znaczenie ma także system przy monitoringu łożysk zarówno przednich, jak i tylnych, ze względu na częste uszkodzenia występujące w nim, np. uszkodzenie pierścienia wewnętrznego lub zewnętrznego. Dzięki możliwości badania w różnych osiach oraz wysokiej czułości czujnika, wykryje on wszystkie powstające problemy wraz z ich narastaniem na przestrzeni czasu. [5]

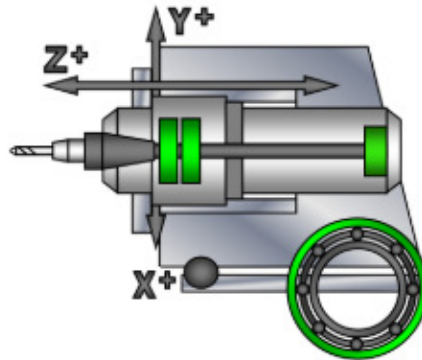


Rysunek 2. Monitoring zużycia osi toru w maszynie [5]

Monitorowanie łożysk wrzeciona odbywa się poprzez śledzenie ewolucji następujących środków dla każdej grupy łożysk:[5]

- wartość szczytowa przy podstawowej i harmonicznym 3 częstotliwości przesunięcia kuli pierścienia zewnętrznego (wm/s^2)
- wartość szczytowa na poziomie podstawowym i harmonicznym 3 częstotliwości piłki w pierścieniu wewnętrznym (wm/s^2)
- wartość szczytowa przy podstawowym i harmonicznym 3 częstotliwości wirowania piłki (wm/s^2)
- wartość szczytowa dla częstotliwości podstawowej i harmonicznym 3 podstawowej częstotliwości pociągu (wm/s^2)

Rysunek 3. przedstawia rodzaje łożysk zamocowanych na wrzecionie (zaznaczone na zielono).



Rysunek 3. Łożyska zamontowane na wrzecionie [5]

W przypadku maszyny 3-osiowej wyposażonej we wrzeciono z 3 grupami łożysk system monitorowania wibracji kontroluje nie mniej niż 27 parametrów na dobę, aby zagwarantować doskonałe monitorowanie stanu technicznego maszyny.[5]

3. Charakterystyka systemów monitorowania drgań

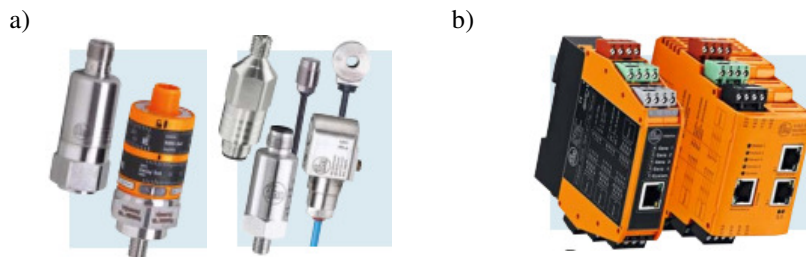
Każda maszyna wytwarza drgania podczas procesów obróbki. Wibracje mogą szybko przekroczyć dopuszczalny poziom z powodu np. niewyważenia, niewłaściwego posadowienia czy rezonansów. Wzrost amplitudy drgań ma negatywny wpływ na stan maszyn, czego wynikiem zazwyczaj są nieoczekiwane awarie oraz krótsza trwałość narzędzi i obrabiarek. Podejmując się implementacji systemu jest możliwość zwiększenia poziomu ochrony nie tylko narzędzia i obrabiarki, ale również potencjalnych wyrobów, które mają powstać podczas obróbki. [4]

Ogólna prędkość drgań jest wykorzystywana w standardach przemysłowych oceny stanu całej maszyny. Norma ISO 10816 klasyfikuje maszyny i zaleca wartości graniczne dla przeciążeń wywołanych drganiami. System monitoruje, czy dopuszczalny stopień drgań maszyny jest przekroczony. Jeśli uszkodzenie jest wykryte na wczesnym etapie, uszkodzone części mogą być wymienione i można uniknąć kolejnych uszkodzeń.[4]

Na system monitorowania wibracji składają się głównie czujniki, akcelerometry do pomiaru drgań oraz moduły przetwarzania. Czujniki są tak projektowane, aby spełniały cechy produktu przemysłowego, wśród których wyróżnić można: kompaktowość, trwałość oraz podłączenie z procesorem za pomocą kabla, który można w dowolnej chwili odłączyć. Cyfrowe łącze komunikacyjne pomiędzy akcelerometrem, a jednostką przetwarzającą można prowadzić poprzez system podtrzymywania kabli wraz z kablami zasilania z wrzeciona. Moduł przetwarzania sygnału został umieszczony w szafie elektrycznej maszyny oraz łączy się z PLC obrabiarki dzięki zastosowaniu niewielkiej liczby cyfrowych wejść/wyjść. Cyfrowy

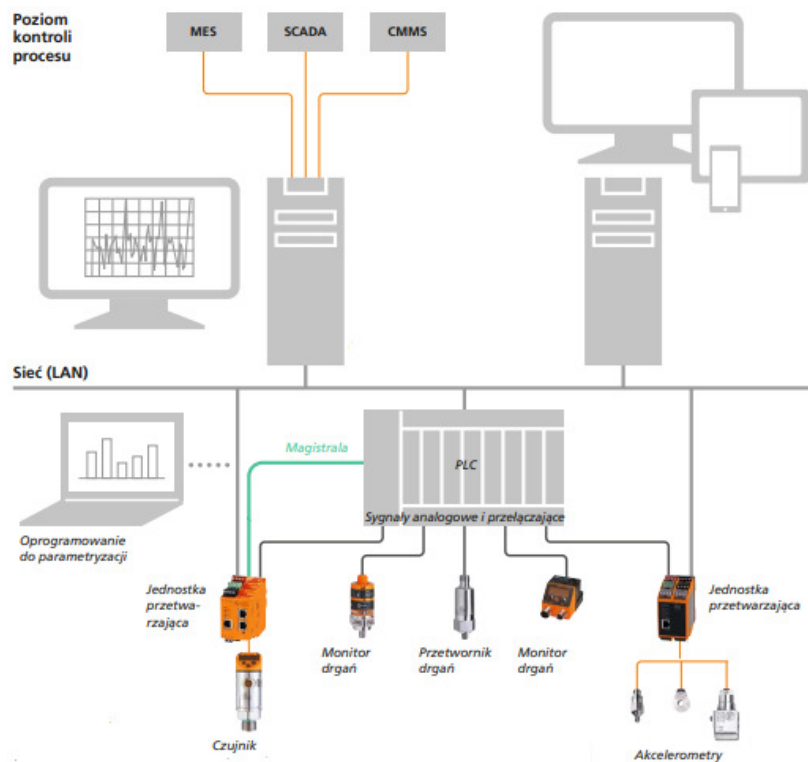
akcelerometr jest zamontowany na wrzecionie i jest podłączony do procesora za pomocą kabla szybkiego odłączania. [4]

Na rys.4 a) zostały przedstawione zostały czujniki (po lewej) oraz akcelerometry (po prawej) do pomiaru drgań, natomiast na rys.4 b) moduły przetwarzania.



Rysunek 4. a) Czujniki i akcelerometry b) Jednostki przetwarzające [4]

Przykładowe zastosowanie powyższych komponentów systemu monitorowania wibracji zostało przedstawione na rys.5, gdzie zostały użyte do stworzenia układu pomiarowego drgań.

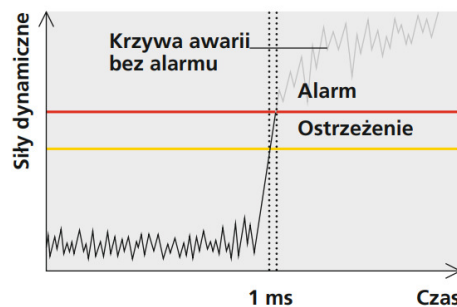


Rysunek 5. Schemat działania systemu monitorowania wibracji [4]

Czujniki oraz akcelerometry pomiarowe są połączone z przetwornikami umieszczonymi w szafie elektrycznej obrabiarki. Zadaniem czujnika jest pomiar wartości drgań oraz reagowanie w przypadku przekraczania tolerancji. Za pomocą czujnika można także sprawdzić niewyważenie elementów maszyny i urządzeń oraz zbadać widmo drgań podczas obróbki. Jeżeli mierzona wartość wibracji zostanie przekroczona poza wytyczone granice tolerancji, nastąpi zatrzymanie działania maszyny w 1 milisekundę. Zatrzymanie ma na celu zapobiegnięciu awarii oraz większym uszkodzeniom i utrzymaniu maszyny w jak najlepszym stanie. PLC jest połączone z innymi systemami sterowania procesem (np. SCADA) czy produkcją (np. MES) w przedsiębiorstwie, aby płynnie przekazywać informacje o wszystkich potencjalnych zagrożeniach lub awariach maszyn. System monitorowania drgań archiwizuje i zapisuje w pamięci dane, które później można w dowolnym momencie odtworzyć. Istotnym elementem funkcjonowania powyższego systemu w przedsiębiorstwie jest samodzielna komunikacja pomiędzy maszynami, czujnikami oraz systemem bez udziału czynnika ludzkiego.[4]

4. Zastosowanie systemu monitorowania wibracji w obrabiarkach

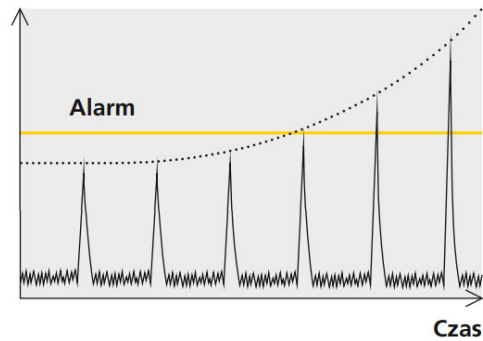
Wadliwe ustawienia narzędzia i parametry procesowe, jak też niewłaściwy wybór narzędzia mogą prowadzić do sytuacji awaryjnych pomiędzy częściami i narzędziami wrzeciona (poprzez zwiększone zużycie). Efektami niewłaściwych działań jest zwiększenie kosztów, skrócenie trwałości narzędzia i odpadami produkcyjnymi. Stały pomiar i ocena różnych drgań umożliwia doskonały monitoring i diagnostykę funkcjonowania wrzeciona. Sytuacje awaryjne są wykrywane w czasie i wyświetlane (rys.6), przez co operator w każdej chwili może podjąć stosowne do momentu działania. Wyjście przełączające może reagować na sytuację awaryjną w ciągu milisekund (kolizja wrzeciona wykrywana jest w ciągu 1 ms) w celu zminimalizowania czy nawet uniknięcia kolejnego uszkodzenia. [4]



Rysunek 6. Wykrywanie awarii w czasie 1 ms [4]

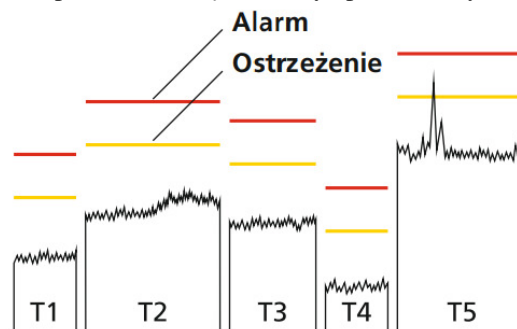
Integracja monitorowania drgań ze sterownikiem maszyny poprzez interfejs sieciowy umożliwia doskonałe dostosowanie oceny (dostosowanie progów alarmowych, tłumienia wartości charakterystycznych które nie mogą być oceniane podczas obróbki, np. łożysko, wrzeciona) do obecnego stanu pracy maszyny. Wraz z zastosowaniem systemu monitorowania wibracji prowadzić można diagnostykę

maszyny i narzędzia w trybie rzeczywistym (rys.7) oraz prowadzić symulacje umożliwiające dostarczenie informacji kluczowych dla procesu obróbki.[4]



Rysunek 7. Diagnostyka w procesach obróbki [4]

Zmiany w siłach skrawania spowodowane stępieniem narzędzia lub zatkanie się wiórami są wykrywane na podstawie zmienionych cech drgań. Każde narzędzie może mieć przypisane indywidualne limity tolerancji, np. progi ostrzegawcze i wyłączania, co przedstawia rys.8. Efektem tego jest ochrona obrabianych elementów na obrabiarce oraz zabezpieczenie narzędzi maszyn przed trwałym uszkodzeniem.[4]



Rysunek 8. Indywidualne dopasowanie tolerancji dla narzędzi[4]

Zastosowanie systemu monitorowania wibracji daje ogromne możliwości od ciągłej kontroli aż po wykrywanie przyczyn powstawania detaliów brakowych. Za pomocą widma drgań można stwierdzić czy komponenty obrabiarki wymagają wymiany lub odpowiednio reagować na pojawiające się zmiany. Natomiast jego najważniejszym atutem jest możliwość zatrzymania pracy maszyny w chwili wykrycia nieprawidłowości podczas procesu obróbki. Ten system jest również idealnym przykładem narzędzia Przemysłu 4.0, gdzie za pomocą czujników i całego systemu potrafi diagnozować problem oraz „komunikować się” z innymi systemami.

5. Korzyści z wdrożenia systemu

Wśród głównych zalet wyróżnić można:

- koszty są niewątpliwie czynnikiem, który przy odpowiednim wykorzystaniu systemu mogą zdecydowanie zwiększyć budżet przedsiębiorstwa, dzięki wielu oszczędnościom;
- czas zaoszczędzony poprzez implementację systemu zamiast nieoczekiwanych awarii maszyn i narzędzi, można efektywnie wykorzystać poprzez realizację bardziej złożonych projektów;
- wydajność systemu produkcyjnego znacząco wzrośnie dzięki implementacji systemu monitorowania wibracji, który poprzez ciągłą kontrolę stanu narzędzi oraz obrabiarek będzie miał możliwość ostrzeżenia przed potencjalnymi awariami, co z kolei wpłynie na produktywność firmy.

Fabryki stają się coraz bardziej zautomatyzowane i mające możliwość autokontroli, ponieważ znajdujące się w nich maszyny mają możliwość analizowania i komunikowania się ze sobą, przez co rola operatora zostaje sprowadzona do kontroli obsługiwanych maszyn i urządzeń. Oznacza to, że maszyny wykorzystują samoopptymalizację, samokonfigurację, a nawet sztuczną inteligencję do wykonywania złożonych zadań w celu zapewnienia znacznie wyższej efektywności pracy, zmniejszenia kosztów oraz podwyższonej jakości towarów lub usług.

6. Podsumowanie

Poziom doskonalenia procesów wytwórczych w przedsiębiorstwie będzie w dużym stopniu zależał od ilości wprowadzania innowacyjnych rozwiązań i technologii. Jedną z najskuteczniejszych dróg to eliminacja szeroko pojętego marnotrawstwa, np. poprzez ograniczanie braków produkcyjnych, wdrażając systemy monitorowania wibracji w obrabiarkach. Ma to na celu zwiększenie systemu kontroli nie tylko detali, ale również narzędzi oraz obrabiarek. Wibracje są takim zjawiskiem, które w odpowiedni sposób przedstawione i przeanalizowane potrafią dostarczyć ogromnej wiedzy o każdym z wyżej wymienionych obszarów. Wszystko będzie zależne od świadomości istnienia możliwości rozwiązań i kreatywności kadry oraz technologów, którzy jeśli wykorzystają potencjał tego systemu będą za jego pomocą rozwiązywali wiele nieoczekiwanych problemów produkcyjnych w niestandardowy, ale efektywny i przynoszący korzyści sposób. Przedsiębiorstwo za pomocą takich działań zmierza w kierunku tworzenia Inteligentnej Produkcji (z ang. Smart Manufacturing), która jest zawarta w ramach podbijającego rynek Przemysłu 4.0, będącego gwarancją najwyższego poziomu rozwoju przedsiębiorstwa i wykorzystania najnowszych innowacji i technologii w systemie produkcyjnym.

LITERATURA

1. HERMANN M., PENTEK T., OTTO B.: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: a Literature Review, Working Paper No. 01/2015, Technische Universität Dortmund, p. 8
2. HULAWY D., TYRTANIA J.: Zastosowanie technologii Virtual Reality w systemach produkcyjnych, Wydawnictwo naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2018 s.116-117.
3. IWAŃSKI T.: Napędy i sterowanie, miesięcznik naukowo-techniczny, Przemysł 4.0 i wszystko jasne nr 1(213)/2017, str.22.
4. Serwis internetowy: https://www.ifm.com/pl/pl/category/070/070_010, dostęp 5.10.2019r.
5. Serwis internetowy: <https://www.digitalway.fr/machine-crash-protection-3/warum-safepilote-kaufen/?lang=de>, dostęp 5.10.2019r
6. Serwis internetowy: http://www.sluzby-ur.pl/artykuly/1790/automatyzacja_procesow_produkcyjnych_to_przyszlosc_przemyslu.html, dostęp 15.10.2019r.
7. Serwis internetowy: <https://epicvr.pl/pl/vr-ar-nowe-technologie-przemysle-rewolucja-przemyslowa-4-0-zmieni-swiat/>, dostęp 09.10.2019r.
8. Serwis internetowy: <http://www.utrzymanieruchu.pl/menu-gorne/artykul/article/czwarta-rewolucja-przemyslowa-i-przemysl-40-co-oznaczaja-te-pojecia/part/1/>, dostęp 12.10.2019r.