

**Tomasz GIESKO, Adam MAZURKIEWICZ, Andrzej ZBROWSKI,
Piotr CZAJKA**

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom

OPTOMECHATRONICZNY SYSTEM DO AUTOMATYCZNEJ KONTROLI JAKOŚCI WYROBÓW W PRZEMYŚLE

Słowa kluczowe

Optyczna inspekcja, system optomechatroniczny, struktura systemu, katalog wad.

Streszczenie

W artykule zaprezentowano opracowany system optomechatroniczny do kontroli jakości powierzchni precyzyjnych wyrobów metalowych w przemyśle. W celu zastąpienia kontroli wzrokowej zastosowano technikę maszynowego widzenia, specjalizowane oprogramowanie do analizy obrazów oraz technologie mechatroniczne. W procesie inspekcji zastosowano współbieżną realizację zadań. Opracowano metodę i specjalne urządzenie do oczyszczania powierzchni przed inspekcją. Na podstawie opracowanego rozwiązania wykonano systemy optycznej inspekcji w wersji przemysłowej, które zostały wdrożone w liniach wytwarzania elementów łożysk tocznych.

Wprowadzenie

Jakość, oprócz ceny wyrobu i wydajności produkcyjnej, jest podstawowym atutem producenta. Konkurencja rynkowa zmusza firmy do zastępowania trady-

cyjnej, wizualnej kontroli jakości produkowanych wyrobów przez nowe technologie, w tym systemy automatycznej optycznej inspekcji [2, 3]. Zgodnie z obecnymi trendami najbardziej zaawansowane linie technologiczne spełniają kryterium „zero braków”, coraz częściej stanowiące warunek znalezienia nabywcy na produkowane wyroby, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym.

Wykorzystanie technologii mechatronicznych i informatycznych umożliwia opracowywanie zautomatyzowanych systemów inspekcji, realizujących w ramach zintegrowanej struktury zadania pomiarów parametrów wyrobu, selekcji i transportu. Szczególne walory optoelektronicznych metod pomiarowych i silnie rosnące zapotrzebowanie na ich aplikacje wynikają przede wszystkim z bezkontaktowego charakteru pomiaru i osiągnięcia maksymalnych rozdzielczości pomiarowych w różnych skalach. Efektem połączenia systemów wizyjnych i mechatronicznych układów wykonawczych są systemy optomechatroniczne zdolne do wykonywania złożonych i specjalistycznych zadań w ramach realizowanych procesów technologicznych [5]. Wiele systemów inspekcji jest wdrażanych w już istniejących liniach technologicznych, w ramach ich modernizacji. W związku z tym modularyzacja struktur takich systemów oraz możliwość adaptacji oprogramowania do nowych zadań tworzą perspektywy przyszłych zaawansowanych, elastycznych systemów inspekcji.

Dzięki rozwojowi technologii optomechatronicznych bezkontaktowe urządzenia pomiarowe i systemy kontroli jakości precyzyjnych wyrobów metalowych są coraz szerzej stosowane w przemyśle maszynowym i motoryzacyjnym. Większość z nich jest przystosowana do pracy w warunkach warsztatowych, poza linią technologiczną. Nieliczne, najbardziej zaawansowane systemy wyróżniają: możliwość pracy automatycznej w liniach technologicznych, liczba wykrywanych wad oraz wydajność procesu inspekcji. Wiodący światowy producent łożysk tocznych – firma SKF – wykorzystuje systemy optycznej inspekcji wyposażone w matrycowe i linijkowe kamery CCD do wykrywania następujących wad powierzchni elementów tocznych łożysk: pęknięć, ubytku materiału, korozji, zanieczyszczeń oraz wad geometrii kształtu [10]. Urządzenia osiągają wydajność procesu kontroli jakości rzędu 1–2 sztuk/s. Do inspekcji powierzchni cylindrycznych wałeczków łożyskowych wykorzystywana jest metoda skanowania za pomocą kamer linijkowych. System opracowany przez firmę Koyo umożliwia inspekcję powierzchni bocznej wałeczków i wykrywanie deformacji powierzchni, wad szlifowania, rys oraz plam z rozdzielczością pomiarową około 0,3 mm [8]. W systemie zastosowano specjalizowane algorytmy analizy obrazów do detekcji i identyfikacji wad. W dostępnych publikacjach brak jest analiz problemu eliminacji wpływu zanieczyszczeń znajdujących się na powierzchniach przed procesem inspekcji.

Z analiz publikacji naukowych i informacji technicznych wynika, że producenci łożysk tocznych nadal powszechnie stosują tradycyjne wizualne metody kontroli jakości, wspomagane jedynie pomiarami pomocniczymi urządzeń po-

miarowych. Podstawowe wady takich rozwiązań to brak powtarzalności i ograniczona dokładność kontroli oraz zmienna efektywność i niezawodność [9]. Zaawansowane, wysokowydajne systemy automatycznej optycznej inspekcji do wieloparametrycznej kontroli jakości w warunkach przemysłowych są nadal rozwiązaniami o unikatowym charakterze.

W ramach Programu Wieloletniego PW-004 pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008” [6] Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy w Radomiu podjął współpracę z zespołem badawczym z Politechniki Wrocławskiej, której celem był rozwój metod optycznej inspekcji na potrzeby kontroli jakości w przemyśle. Efektem wspólnie zrealizowanych prac badawczych i wdrożeniowych są metody i systemy automatycznej optycznej inspekcji (AOI) dedykowane do międzyoperacyjnej kontroli jakości wyrobów metalowych w przemyśle motoryzacyjnym i maszynowym [4]. Implementacja opracowanego systemu w linii technologicznej i jego weryfikacja zostały zrealizowane z udziałem specjalistów inżynierów w Fabryce Łożysk Toczących S.A. w Kraśniku.

1. Metoda optycznej inspekcji

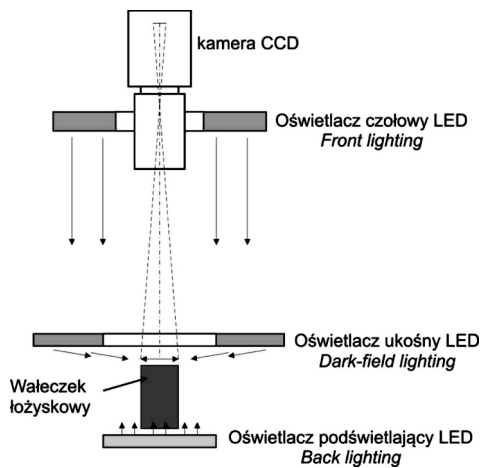
Celem podjętych prac badawczych było opracowanie metody detekcji i identyfikacji wad powierzchni czołowych wałeczków łożyskowych. Na wstępnym etapie opracowania koncepcji przeprowadzono analizę i systematyzację 20 wad zidentyfikowanych przez technologów producenta łożysk, które były ujęte w programie kontroli jakości [4]. Podstawowe grupy wad obejmowały: wady geometrii czoła wałeczka opisywane przez odchyłki kołowości i centryczności, wady materiałowe, jak ubytki, wady powierzchni, jak pęknięcia i rysy oraz wady szlifowania. Producent łożysk wyznaczył dokładność pomiaru w procesie wykrywania wad rzędu 50 μm . Kolejnym wymogiem była możliwość prowadzenia międzyoperacyjnej kontroli jakości i selekcji wyrobów w linii technologicznej z szybkością dostosowaną do parametrów linii. W przypadku produkcji wałeczków łożyskowych wynosi ona około 2–3 szt./s.

Prace badawcze i eksperymenty laboratoryjne dotyczyły przede wszystkim następujących zagadnień:

- wizualizacja powierzchni metalowej poddawanej inspekcji z wykorzystaniem odpowiednich technik oświetlenia;
- wysokowydajne algorytmy przetwarzania i analizy obrazów;
- eliminacja lub ograniczenie wpływu czynników utrudniających przeprowadzenie inspekcji;
- opracowanie modułów mechatronicznych zapewniających uzyskanie wymaganej szybkości strumienia wyrobów poddawanych inspekcji.

Opracowany modelowy system wizyjny zawiera monochromatyczną kamerę CCD, obiektyw z regulowaną ogniskową oraz system oświetlenia (rys. 1).

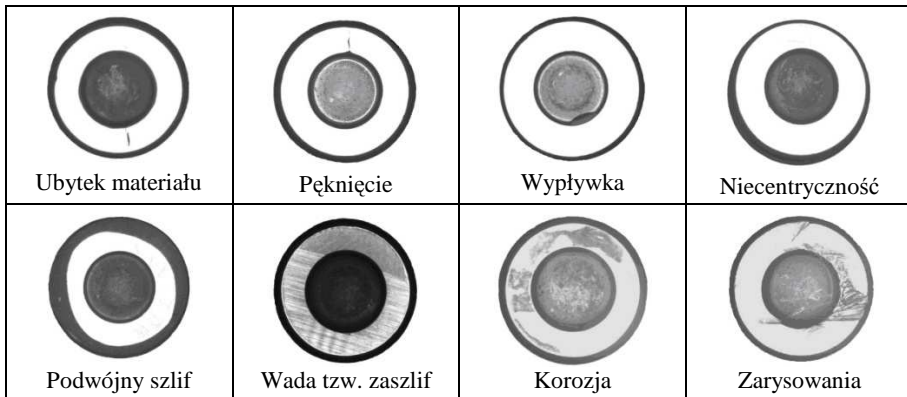
Uzyskana rozdzielczość układu optycznego wynosi około 30 μm . Analizując różnorodność występujących wad, w trakcie badań eksperymentalnych przeprowadzono modelowanie metod oświetlenia umożliwiających osiągnięcie m.in. wysokiego kontrastu pomiędzy tłem a wadą. Zastosowano następujące metody ze względu na usytuowanie źródła światła względem obiektu: oświetlenie czołowe, oświetlenie ukośne, oświetlenie kierunkowe, podświetlenie obiektu. Ponadto zastosowano różne barwy oświetlenia. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów wskazały, że różne grupy wad wymagają zastosowania odpowiedniego oświetlenia [4, 7].



Rys. 1. Struktura systemu wizyjnego

Efektom zrealizowanych prac badawczych jest katalog prezentujący sklasyfikowane wady, ze szczegółowym opisem ich cech i opisem zastosowanej metody wykrywania. Przeprowadzone z wykorzystaniem modelowego systemu wizyjnego badania dostarczonych przez producenta partii wałeczków umożliwiły identyfikację i parametryzację wielu subtelnych wad powierzchni dotychczas niewykrywanych w tradycyjnej kontroli jakości. Katalog wad rozszerzono do ponad 30 [4]. Przykłady najbardziej typowych identyfikowanych wad prezentuje rys. 2.

Jak wykazały badania, wykrywanie wszystkich rodzajów zidentyfikowanych wad czoła wałeczka wymaga przeprowadzenia analizy kolejno rejestrowanych obrazów w różnych warunkach oświetlenia. Biorąc pod uwagę fakt, że wraz ze zwiększeniem liczby obrazów zwiększa się także łączny czas inspekcji jednego wałeczka, przeprowadzono analizę stosowanych metod oświetlenia i zastosowano odpowiednią ich kombinację, co umożliwiło ograniczenie liczby pobieranych obrazów do 6 [4].



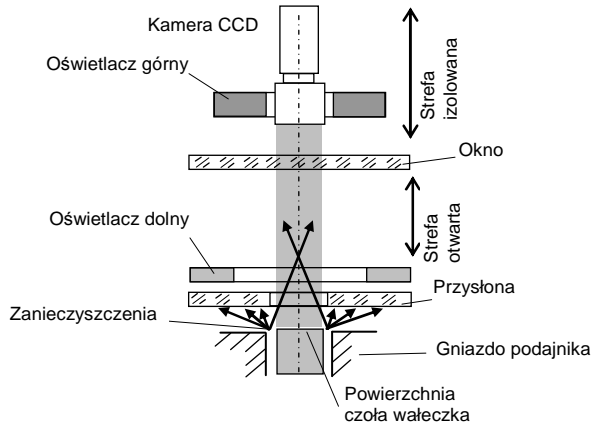
Rys. 2. Przykłady wykrytych wad

Istotnym zagadnieniem w niestacjonarnych procesach inspekcji optycznej jest zjawisko rozmycia obrazu [1]. W przypadku opracowywanego systemu, możliwe byłoby rejestrowanie obrazów w trakcie ruchu jednostajnego obiektu w strefie inspekcji. Warunkiem podstawowym ograniczenia zjawiska rozmycia jest odpowiednio krótki czas akwizycji, co jednak wymaga zwiększenia strumienia światła emitowanego przez oświetlacze. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że system wizyjny jest bardzo czuły na zmiany położenia kąтового powierzchni czoła wałeczka względem osi optycznej, co może zakłócić wyniki inspekcji. Zdecydowano o przyjęciu koncepcji procesu inspekcji w warunkach, gdy wałeczek jest pozycjonowany przez wymagany czas. Do pozycjonowania wytypowano podajnik obrotowy napędzany za pomocą serwosilnika.

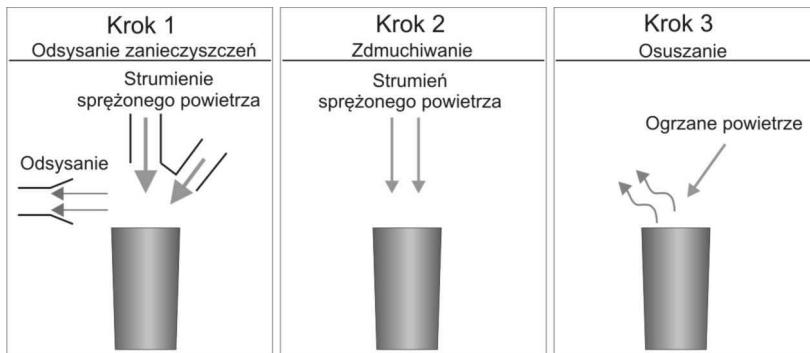
Na linii wytwarzania wałeczków występują bardzo trudne warunki, przede wszystkim kondensacja par i zanieczyszczenia nanoszone na powierzchni urządzeń. Analiza warunków rzeczywistych wykazała konieczność opracowania metody ograniczającej wpływ tych czynników na działanie systemu wizyjnego. Na rys. 3 zaprezentowano oryginalną metodę ochrony elementów systemu wizyjnego. Stosując szklaną przesłonę w dolnej części modułu wizyjnego, uzyskano skuteczne rozwiązanie problemu. Większość zanieczyszczeń osadza się na powierzchni przesłony, nie wpływając w istotnym stopniu na strumień świetlny emitowany przez dolny oświetlacz. Do strefy ponad przesłonę dostaje się jedynie niewielka ilość zanieczyszczeń. Badania weryfikacyjne w warunkach rzeczywistych potwierdziły, że jednokrotna wymiana okna i przysłony na czyste w trakcie jednej zmiany (8 godzin pracy) jest wystarczająca dla zachowania wymaganych warunków pracy modułu wizyjnego.

Wałeczki łożyskowe w procesie wytwarzania są pokryte zanieczyszczeniami i płynami technologicznymi, które uniemożliwiają przeprowadzenie in-

spekacji powierzchni bez ich oczyszczenia. Zanieczyszczenia o rozmiarach ponad założoną dokładność pomiarów mogą być rozpoznane jako wady. Dodatkowo plamy cieczy na powierzchni wałeczka mogą wywoływać efekty odbicia, poświaty lub soczewki, które przyczyniają się do zaburzeń w obrazie. Przeprowadzone badania wykazały, że oczyszczanie powierzchni przed inspekcją jest warunkiem koniecznym. W opracowanej oryginalnej metodzie oczyszczania czoła wałeczka zastosowano technikę pneumatyczną [3, 4]. Proces oczyszczania jest realizowany w 3 krokach (rys. 4). Zanieczyszczenia są usuwane za pomocą odpowiednio ukierunkowanych strumieni sprężonego powietrza i natychmiast odsysane. W ostatnim kroku strumień powietrza ogrzewanego w procesie odzysku ciepła w układzie pneumatycznym osusza powierzchnię czoła wałeczka.

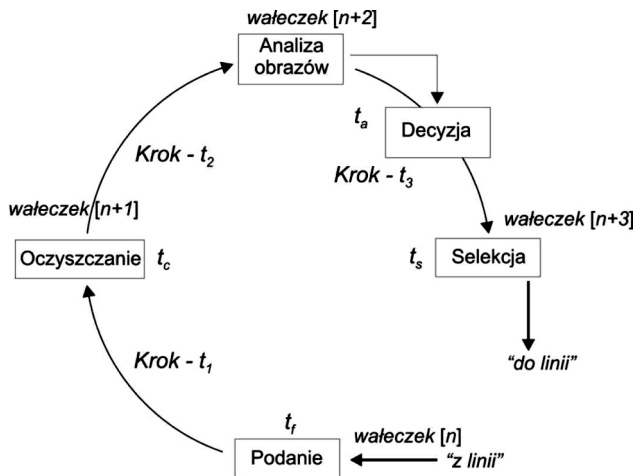


Rys. 3. System ochrony modułu wizyjnego przed rozbryzgami



Rys. 4. Proces czyszczenia czoła wałeczka w systemie optycznej inspekcji

Kolejne etapy procesu inspekcji: podawanie wałeczków, oczyszczanie, inspekcja i selekcja są realizowane w układzie współbieżnym. Do transportowania wałeczków zastosowano podajnik obrotowy. Tarcza podajnika posiada gniazda, w których umieszczane są wałeczki dostarczane z linii technologicznej. Obrót podajnika o ustalony kąt przemieszcza wałeczki do kolejnych pozycji roboczych. Równoległe wykonywane są trzy zadania: oczyszczanie, rejestracja i analiza obrazów, selekcja (rys. 5).



Rys. 5. Schemat procesu inspekcji

Podanie kolejnego wałeczka jest możliwe, gdy zakończą się zadania inspekcji i selekcji dla poprzedzających detali. W przypadku zadania obejmującego analizę obrazów i wygenerowanie przez system decyzji dla selektora proces ten jest kontynuowany, gdy wałeczek opuści strefę inspekcji i jest kierowany do pozycji selektora. Rozwiązanie takie umożliwiło zwiększenie szybkości działania systemu inspekcji. Minimalny osiągnięty czas jednego cyklu inspekcji przedstawia równanie:

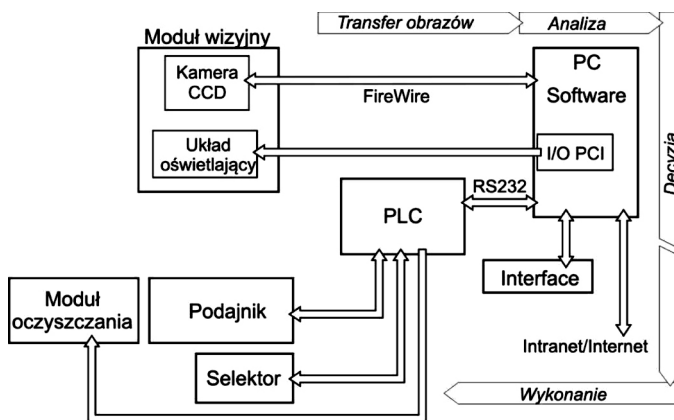
$$t_{\min} = \sum_1^3 t_i + \max\{t_f; t_c; t_a; t_s\} \quad (1)$$

gdzie:

- t_i – czas wykonania skoku podajnika ($t_i < 300$ ms),
- t_f – czas podania wałeczka z układu transportera linii ($t_f < 200$ ms),
- t_c – czas oczyszczania czoła wałeczka ($t_c < 200$ ms),
- t_a – czas inspekcji ($t_a < 250$ ms),
- t_s – czas działania siłownika selektora ($t_s < 100$ ms).

Wartości czasów poszczególnych zadań zostały wyznaczone w trakcie badań systemu.

Struktura systemu AOI została przedstawiona na rys. 6. Do sterowania układów wykonawczych zastosowano sterownik PLC. Czujniki położenia zapewniają stałą kontrolę działania mechanizmów i przemieszczania wałeczków. Zadania przetwarzania i analizy obrazów, analiz statystycznych i archiwizacji są realizowane przez komputer przemysłowy. Interfejs systemu informatycznego umożliwia bieżący podgląd pracy urządzenia, ustalanie i kontrolę parametrów inspekcji, diagnozowanie systemu oraz generowanie raportów.



Rys. 6. Struktura systemu

Opracowany system inspekcji jest wyposażony w funkcję telemonitoringu zapewniającą zdalny dostęp do systemu poprzez połączenie sieciowe. Wykorzystując telemonitoring, możliwy jest serwis systemu i optymalizacja parametrów inspekcji bez konieczności przyjazdu specjalistów do fabryki.

2. Wdrożenie systemu

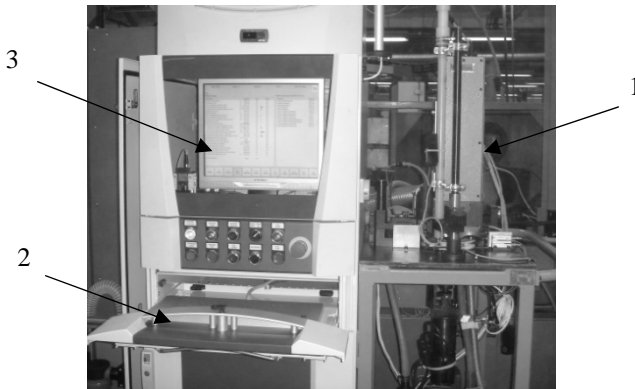
Opracowany system optycznej inspekcji został zainstalowany w linii wytwarzania wałeczków łożyskowych (rys. 7).

Badania weryfikacyjne systemu w rzeczywistych warunkach pracy, w linii produkcyjnej obejmowały następujące zagadnienia:

- funkcjonalność systemu w zakresie oprogramowania i obsługi interfejsu operatora,
- niezawodność działania systemu komputerowego,
- poprawność i powtarzalność wykrywania wad zgodnie z katalogiem wad,
- niepewność pomiarowa w procesie inspekcji,
- poprawność działania mechatronicznych układów wykonawczych,

- obsługa serwisowa systemu wykonywana przez operatora,
- obsługa serwisowa systemu z wykorzystaniem sieci Internet realizowana przez administratora,
- procedury postępowania obsługi w przypadku awarii.

Dokładność pomiarowa i niezawodność systemu zostały potwierdzone w ramach długich testów [4]. Test polegający na inspekcji partii 100 tys. sztuk wałeczków potwierdził pełną skuteczność działania systemu dla ustalonych poziomów czułości.



Rys. 7. System optycznej inspekcji zainstalowany w linii produkcyjnej: 1 – moduł wizyjny, 2 – pulpit operatora, 3 – monitor

System pilotowy oraz kolejne systemy, które zostały wdrożone w Fabryce Łożysk Toczyńskich S.A. w Kraśniku są eksploatowane od kilku lat, zastępując całkowicie kontrolę wizualną.

Etap implementacji i pierwszych badań weryfikacyjnych w rzeczywistych warunkach eksploatacji pokazał, że jest to moment kluczowy w przypadku transferu rozwiązań innowacyjnych do przemysłu. Brak możliwości pełnej symulacji warunków rzeczywistych na etapie badań laboratoryjnych spowodował, że część istotnych problemów ujawniła się dopiero w trakcie badań w fabryce. Innym ważnym zagadnieniem jest postawa pracowników różnych szczebli w trakcie realizowanego przedsięwzięcia. W pokonaniu istniejących barier pomogło włączenie personelu produkcyjnego do aktywnego udziału w badaniach i procesie doskonalenia rozwiązania. Ten etap oraz doświadczenia sukcesywnie gromadzone w trakcie eksploatacji wdrożonych systemów pokazują także, że do obsługi serwisowej złożonych urządzeń o wysokim poziomie zaawansowania technicznego niezbędny jest pracownik o dużej wiedzy z zakresu informatyki i podstaw pomiarów w przemyśle.

Podsumowanie

Zaawansowane metody optycznej inspekcji oraz technologie mechatroniczne umożliwiają automatyzację kontroli jakości wyrobów w produkcji masowej, zapewniając osiągnięcie wysokich dokładności pomiarów oraz efektywności. W wielu aplikacjach wdrożenie opracowanego systemu i jego integracja w eksploatowanej linii produkcyjnej przy zachowaniu dotychczasowej struktury linii oraz utrzymaniu wydajności procesu wymaga zastosowania odpowiedniej metodyki projektowania i implementacji systemów. Na etapie projektowania ważną rolę pełni modelowanie i symulacja komputerowa, umożliwiające eliminację błędów i optymalizację rozwiązania. Osiągnięcie wysokiej wydajności procesu inspekcji było możliwe dzięki synchronizacji poszczególnych procesów i ich realizacji w układzie współbieżnym.

Oryginalne i innowacyjne cechy rozwiązania polegają na zastosowaniu zaawansowanych algorytmów przetwarzania i analizy sekwencji obrazów umożliwiających jednoczesne wykrywanie i identyfikację ponad 30 wad mikrogeometrii powierzchni i kształtu wyrobów oraz procedur ustawień i kalibracji systemu pomiarowego. Wyróżniającym walorem opracowanego systemu jest wysoka rozdzielczość pomiarowa około 30 μm , umożliwiająca dokładną kontrolę jakości powierzchni metalowych o wysokich klasach wykonania. Dzięki zastosowaniu opracowanej metody oczyszczania powierzchni obniżony został poziom wrażliwości modułu wizyjnego na zakłócenia, co przyczyniło się do podwyższenia niezawodności systemu. Opracowany system jest przystosowany do pracy ciągłej w linii produkcyjnej przy zapewnieniu wysokiej wydajności procesu kontroli jakości rzędu 2–5 szt./s. Komunikacja w sieci intranet/Internet umożliwia stałe monitorowanie pracy systemu oraz bieżące śledzenie statystyk uzyskiwanego poziomu jakości produkowanych wyrobów. Na tle techniki światowej jest to rozwiązanie unikatowe, prezentujące najwyższy poziom w zakresie liczby i rodzajów wykrywanych wad, wydajności procesu inspekcji oraz odporności na zakłócenia.

Zespół realizatorów przedsięwzięcia z Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego w Radomiu, Politechniki Wrocławskiej i Fabryki Łożysk Toczyń S.A. w Kraśniku otrzymał w 2011 roku Nagrodę Prezesa Rady Ministrów za wybitne osiągnięcie naukowo-techniczne.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Batchelor B., Waltz F.: Intelligent machine vision. Springer-Verlag Limited 2001, pp. 18–20, 223.
2. Dashchenko A. (ed.): Manufacturing Technologies for machines of the future. Springer-Verlag 2003, pp. 40–44.
3. Giesko T., Mazurkiewicz A., Zbrowski A.: Automatic optical inspection of metallic surfaces in industry. In: A. Mazurkiewicz (ed.) Technological Innovations for Sustainable Development. Wydawnictwo Ministerstwa Gospodarki i ITeE – PIB, Radom (Poland) – Tel-Aviv (Israel), 2009.
4. Giesko T., Reiner J., Zbrowski A.: System wysokowydajnej kontroli jakości powierzchni wyrobów metalowych o wysokich klasach wykonania z wykorzystaniem optycznej inspekcji. Sprawozdanie końcowe. Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2009.
5. Hyungsuck Cho (ed.): Opto-mechatronic systems handbook. CRC Press LLC, 2003.
6. Mazurkiewicz A. (red.): Program Wieloletni pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008” – Raport końcowy. Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2009.
7. Mrzygłód M., Reiner J.: Inspekcja wizyjna jakości powierzchni metalowych po obróbce szlifowaniem. In: E. Chlebus (ed.) Inżynieria Produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006.
8. Nogami Y., Yamada K., Morikawa H.: Image Processing System for Visual Inspection of Cylindrical Parts. Koyo Engineering Journal English Edition No. 166E (2004), pp. 69–73.
9. Salvendy G., Karwowski W.: Design of Work and Development of Personnel in Advanced Manufacturing. Human factors in test and inspection. Willey-IEEE 1994, pp. 355.
10. www.skf.com/portal/skf/home/products?contentId=343084&lang=en

Recenzent:
Józef GAWLIK

Opto-mechatronic system for automatic inspection in industry

Key words

Optical inspection, opto-mechatronic system, system structure, catalogue of defects.

Summary

The article presents the developed opto-mechatronic system for surface inspection of precision metallic parts in industry. To replace human visual inspection, the machine vision method, specialised and unique software for image analysis and mechatronic technology were applied. The concurrent tasks execution was applied in the inspection process. The method and original setup for cleaning the surface before inspection were developed. Optical inspection systems, based on the designed solution, were developed and implemented in manufacturing lines of bearing rollers