

Maciej CHLEBUS*, Sylwia WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA*

WYBRANE PROBLEMY OCENY NIEZAWODNOŚCIOWEJ PROCESÓW PRODUKCYJNYCH

DOI: 10.21008/j.0239-9415.2017.072.01

W artykule autorzy skupili się na problemie oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych. Analizy niezawodności procesów produkcyjnych wymagają uwzględnienia wielu różnych czynników oraz uwarunkowań. W związku z tym, opierając się na opracowanej wielowymiarowej definicji niezawodności procesu produkcyjnego, przedstawiono przegląd literatury z obszaru inżynierii niezawodności systemów produkcyjnych. Następnie na podstawie studium przypadku wskazano możliwości implementacji opracowanego podejścia. Pracę kończy podsumowanie oraz wskazanie dalszych kierunków prac badawczych.

Słowa kluczowe: proces produkcyjny, ocena niezawodnościowa, studium przypadku

1. WPROWADZENIE

Jednym z głównych wyzwań, przed jakimi stają funkcjonujące dziś przedsiębiorstwa produkcyjne, jest wysoki poziom konkurencyjności, który zmusza firmy do pełnego zaspokajania zmiennych wymagań klienta przy jednoczesnym zapewnieniu dużej elastyczności realizowanych procesów (Plewa, 2009; Tubis, 2010). Takie wyzwania, jak coraz krótsze cykle życia produktów i technologii, oczekiwania co do krótszych czasów dostaw czy poziomu jakości produktów oraz zmienność popytu powodują, że niezawodność i jakość procesów i systemów produkcyjnych są jednymi z kluczowych parametrów oceny ich funkcjonowania (Dai et al., 2015; Lin, Chang, 2012).

W obszarze funkcjonowania systemów produkcyjnych głównym celem realizowanych procesów jest wykorzystanie wszystkich zasobów niezbędnych do wy-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny.

produkcji wyrobu końcowego z dostarczonych surowców (Fertsch et al., 2011; Hamrol, 2015). Biorąc to pod uwagę, można zaproponować definicję niezawodności procesu produkcyjnego jako „zdolności systemu produkcyjnego do pełnego wykonania planu produkcyjnego poprzez wyprodukowanie w pełni wartościowych wyrobów gotowych w określonym przedziale czasu i w określonych warunkach operacyjnych”. Wyróżnione uwarunkowania operacyjne szerzej opisano w pracy (Chlebus i Werbińska-Wojciechowska, w druku) – obejmują one:

- poprawność funkcjonowania maszyn i urządzeń produkcyjnych,
- poprawność funkcjonowania infrastruktury utrzymania i wsparcia logistycznego,
- przepływy informacyjne i ich poprawna realizacja,
- możliwość pojawienia się zewnętrznych i wewnętrznych zagrożeń,
- procesy podejmowania decyzji oraz czynnik ludzki.

Pełna analiza niezawodnościowa powinna uwzględniać ocenę wszystkich pięciu obszarów funkcjonowania systemów produkcyjnych. Jednakże, jak wynika z dostępnej literatury, przedsiębiorstwa produkcyjne są zwykle skupione na wdrożeniu inżynierii jakości (np. Elsayed, 2000; Myszewski, 2011) lub podejścia mieszanego – inżynierii jakości i niezawodności (np. Jodejko-Pietruczuk i Plewa, 2014; Nowakowski, 2006; Savage i Carr, 2001; Szwedzka i Jasiulewicz-Kaczmarek, 2011) w celu poprawy ich efektywności funkcjonowania i produktywności. W związku z tym wszelkie korzyści związane z wdrożeniem podejścia wielowymiarowego są pomijane, co może być związane np. z:

- brakiem świadomości kadry zarządzającej odnośnie do zalet podejścia kompleksowego w obszarze oceny niezawodności systemów/procesów produkcyjnych,
- brakiem danych niezbędnych do wdrożenia wielowymiarowej oceny nieuszkodzalności systemów/procesów produkcyjnych,
- brakiem wytycznych dotyczących oceny nieuszkodzalności procesów/systemów produkcyjnych w zależności od zmiennych uwarunkowań operacyjnych.

Dlatego też, celem artykułu jest przedstawienie możliwości przeprowadzania oceny niezawodnościowej procesów/systemów produkcyjnych w ujęciu wielowymiarowym. Artykuł jest rozwinięciem pracy (Chlebus, Werbińska-Wojciechowska, w druku), gdzie skupiono się na aspekcie oceny wskaźnikowej funkcjonowania systemów produkcyjnych. W związku z tym w kolejnym punkcie skupiono się na przedstawieniu przeglądu literatury z badanego obszaru. Następnie przedstawiono studium przypadku, umożliwiające ocenę możliwości wdrożenia opracowanego podejścia wielowymiarowej analizy niezawodnościowej. Pracę kończy podsumowanie oraz wskazanie kierunków dalszych prac badawczych.

2. OCENA NIEZAWODNOŚCIOWA PROCESÓW PRODUKCYJNYCH – PRZEGLĄD LITERATURY

Złożoność i różnorodny charakter wydajności systemów produkcyjnych sprawia, że można znaleźć wiele prac obejmujących zagadnienia inżynierii niezawod-

ności w najnowszej literaturze. Problemy oceny w tym zakresie zyskały duże zainteresowanie od lat 60. XX w. (Dhillon, 2005). Różne podejścia opracowano w celu przeprowadzenia oceny i optymalizacji wydajności procesów produkcyjnych. Według autora prac (Dhillon, 2006; 2005) główne metody oceny niezawodności, które również mogą być użyte do analizy wydajności procesów produkcyjnych, obejmują:

- analizę FMEA,
- analizę drzewa błędów (FTA),
- metodę redukcji sieci (*Network Reduction Method*),
- metodę dekompozycji,
- metoda analizy wspólnej przyczyny uszkodzeń (*Common Cause Failure Analysis*).

Znane modele niezawodnościowe procesów i systemów produkcyjnych można podzielić na pięć głównych grup:

- modele oparte na ocenie wskaźnika niezawodności,
- modele obejmujące zagadnienia utrzymania maszyn produkcyjnych w stanie zdadności zadaniowej,
- modele oparte na inżynierii jakości,
- modele uwzględniające zarządzanie zapasami,
- rozbudowane modele produkcyjne (obejmujące na przykład wdrożenie strategii produkcji (na przykład systemu *Just-In-Time*) lub modele optymalizacyjne (na przykład modele ekonomiczne produkcji seryjnej)).

Ponadto w literaturze niezawodność procesu produkcyjnego definiuje się w różny sposób. Jedną z pierwszych prac poświęconych problematyce modelowania niezawodności systemu produkcyjnego napisał Curtin (1959). Autor stosuje podejście Monte Carlo do prognozowania i oceny niezawodności systemu. Później Mayne (1960) przedstawia dwa modele niezawodności złożonych z dobrych i złych okresów na liniach produkcyjnych. Bierze pod uwagę kontrolę jakości i potrzebę czynności naprawczych w przypadku „złych” okresów oraz opóźnień produkcyjnych związanych z tymi „złymi” okresami. W tym samym roku Hosford (1960) podaje definicje takich pojęć, jak niezawodność, trwałość, dostępność i proponuje interwałowy model produkcji. Lefkovitz (1977) pokazuje zasady projektowania systemów produkcyjnych z uwzględnieniem zakłóceń. Skupia się na unikaniu awarii, w czasie ponownej produkcji i jej kosztach, kontroli jakości i procesów produkcyjnych oraz na całkowitych kosztach produkcji. Dwa lata później Meyer, Rothkopf i Smith (1979) analizują związek pomiędzy popytem a średnim poziomem zapasów i jego wpływem na czasy napraw i czasy awarii.

W latach 80. Blumenthal, Greenwood oraz Herbach (1984) koncentrują się na problemie starzenia się sprzętu i narzędzi oraz jego wpływie na zawodność procesu produkcyjnego. Buzacott i Yao (1986), w swoich modelach analitycznych pokazują znaczenie kontroli przepływu, routingu oraz sekwencji procesu produkcyjnego. Pokazują oni także wpływ czasów przezbrajania maszyn na wydajność procesów. W tym samym roku Filus (1986) sprawdza zależność między obciążeniem systemu oraz awariami systemu i urządzeń. De Mare i Rosander (1988) opisują liczne stu-

dia przypadków dla różnych rodzajów systemów produkcyjnych. Chakraborty oraz Ankiah (1989) przedstawiają ocenę systemu produkcyjnego metodą Monte Carlo.

Davy, White, Merritt oraz Gritzmacher (1992) opracowali zbiór wiedzy na temat JIT i zaproponowali prosty model systemu produkcji JIT. Chen i Yao (1992) proponują płynny model systemu produkcyjnego z losowymi zakłóceniami. Ponadto opisują tam czynniki wpływające na wydajność procesu produkcyjnego. Berg, Posner oraz Zhao (1994) zbudowali kompleksowy model produkcyjny, który zawiera dane takie jak popyt, pojemność systemu, wydajność maszyn, stan magazynowy i niezawodność maszyn. Moinzadeh oraz Klastorin (1995) zbadali zależność pomiędzy niezawodnością procesu produkcji, kosztami zatrzymania produkcji oraz kosztami związanymi z przeróbkami w przypadku pojawienia się wadliwych elementów w produkcie końcowym. Denardo i Lee (1996) w swoim artykule skupiają się na jakości, buforze zapasów i potrzebie przeróbek na linii produkcyjnej w układzie szeregowym. W artykule Moinzadeh oraz Aggarwal (1997) zdefiniowali niezawodność jako czas pomiędzy awariami. Autorzy także kontrolują koszty operacyjne i poziom zapasów. Denardo i Tang (1997) dzielą proces produkcyjny na etapy i sprawdzają niezawodność każdego etapu w oparciu o popyt, poziom zapasów i obsługę klienta. Używają bufora zapasów i współczynnika przywrócenia jako wskaźników wydajności.

Iravani, Duenyas, Olsen (2000) analizują system produkcji i zapasów pod kątem awarii systemu, konserwacji, kosztu potencjalnych strat oraz kary za opóźnienia. Sprawdzają zależność czasową awarii pomiędzy inspekcjami oraz ograniczoną dostępnością ekipy remontowej. Później Tsou i Chen (2005) wykorzystują Poka-Yoke, aby zwiększyć niezawodność produkcji oraz zmniejszyć defekty produkcyjne. Ich głównymi wskaźnikami są koszty produkcji i koszty jakości. Pan i So (2010) łączą wydajność i niezawodność procesów dostaw i produkcji z zapasami, kosztami, czasem realizacji zamówienia oraz popytem. Graves, Anderson-Cook i Hamada (2010) opisują kilka modeli w systemach produkcyjnych. Używają oni metod bayesowskich i metodę Markowa. Louit, Pascual, Banjevic oraz Jardine (2011) prezentują niezawodnościowe podejście do obsługi technicznej. Skupiają się tylko na częściach krytycznych i ich koszcie i dostępności, a także na ich awariach i okresach przestoju. Lin i Chang (2012) rozważali wydajność sieci wytwarzania przez pomiar jej potencjału jako prawdopodobieństwo zaspokojenia popytu. Używają oni metody dekompozycji i przedstawiają dwa modele: model stochastyczny przepływu sieci z działaniem naprawiającym i ten sam wskaźnik awaryjności dla wszystkich urządzeń oraz drugi model, w którym współczynniki awarii są różne. Problem ten jest następnie kontynuowany w pracy Lin i Chang (2013). Kao (2012) przeprowadza dekompozycję równoległego systemu produkcyjnego i pokazuje jego mocne obszary. Koncentruje się na całkowitej wydajności systemu i pokazuje modele zorientowane na wejścia i wyjścia. Przegląd analiz typu RAMs na liniach produkcyjnych żywności podano w (Tsarouhas, 2012). Problem modelowania opóźnień z wykorzystaniem zmiennych i odchyłeń sekwencji przeanalizowano w pracy (Lodding et al., 2014). Autorzy w swojej pracy skupiają się na możliwo-

Tabela 1 cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Siła robocza										+	+																
Starzenie się						+																					
Utrzymanie maszyn								+											+			+					
Wydajność procesu																								+			
MODEL / METODA	Podjęcie Monte Carlo	Interwałowy model produkcji	Model niezawodności produkcji z dobrymi i złymi okresami	Podjęcie hierarchicznej kontroli	Model Markowa – system składowania	Test niezawodności na seryjnej produkcji	Model zależności między uszkodzeniami i obciążeniem systemu	Kontrola przepływu w procesie produkcyjnym	Przypadki równoległej, sekwencyjnej oraz symultanicznej produkcji	Symulacja Monte Carlo	Zarys modelu JIT	Model produkcji ciągłej z przepływem płynnym	Model produkcyjny zawierający pojemność, popyt oraz urządzenia	Model liniowej jakości etapów produkcji z przeróbkami	Model jakościowy z nieuszkodzalnymi elementami	Wąskie gardła produkcyjne – model awarii	Model odzyskiwania poziomu produkcji z etapami wytwarzania	Proces decyzyjny Markowa	Model Poka-Yoke	Modele produkcyjne z wykorzystaniem metod bayesowskich oraz markowa	Deterministyczny i stochastyczny model popytu	Model ryzyka dla części zamiennych	Stochastyczny model sieci przepływu, metoda dekompozycji	Modele zorientowane na wejści i wyjście	Zależności i kolejność odchyleń	Steci wiedzy o ANP	

3. STUDIUM PRZYPADKU

Analizowane przedsiębiorstwo jest firmą prywatną prowadzącą działalność gospodarczą od 1997 r. w branży spawalniczej dla przemysłu motoryzacyjnego. Głównym obszarem produkcji są różnego typu konstrukcje spawane oraz konstrukcje ramowe. Produkowane są także cięższe konstrukcje takie jak ramy, wysięgniki czy łyżki do maszyn budowlanych. Wszystko produkowane jest według indywidualnych projektów klienta.

Powierzchnia analizowanej fabryki to 14 500 m², na których znajduje się nowoczesny park maszynowy, pozwalający sprostać wysokim wymaganiom klientów. Zakład zainwestował w urządzenia do laserowego cięcia stali, numerycznie sterowane roboty spawalnicze, prasy krawędziowe, centra obróbcze, przemysłową lakiernię proszkową oraz przejazdową kabinę lakierniczą do aplikacji farb na mokro. W hali produkcyjnej znajduje się prawie 100 stanowisk roboczych. Najwięcej z nich, bo prawie 40, jest przeznaczonych do spawania półautomatycznego w osł-

nie gazów ochronnych oraz obojętnych. Firmę podzielono na kilka obszarów produkcyjnych oraz pozaprodukcyjne. Obszary te dzielą się na stanowiska.

Analiza niezawodnościowa obejmuje jeden z funkcjonujących obszarów produkcyjnych – obszar lakierni, który obejmuje stanowiska do malowania na mokro, malowania proszkowego, kompletacji i montażu wyrobów. Ten obszar wybrano, że problemy pojawiające się w trakcie realizacji procesu lakierowania obejmują największą liczbę skarg klientów.

Malowanie proszkowe to jedna z technologii malowania, która polega na nakładaniu na wyroby farby w proszku. Obecnie jest jedną z najnowocześniejszych i najbardziej efektywnych technik malowania metali, a uzyskana powłoka lakiernicza jest odporna na korozję, chemikalia, uszkodzenia mechaniczne czy wysoką temperaturę. Jednak decydujące znaczenie dla jakości powłoki ma proces przygotowania powierzchni do malowania. Składa się on z wielu zabiegów technicznych, takich jak: mycie i odtłuszczenie, płukanie wodą wodociągową, fosforanowanie cynkowe, suszenie. Przygotowanie powierzchni składa się z odtłuszczenia, płukania wodą wodociągową, aktywacji, fosforanowania cynkowego, płukania wodą DEMI, pasywacji i suszenia. Znacząca liczba operacji produkcyjnych wiąże się z możliwością pojawienia się wielu wad i błędów w procesie wytwarzania produktu końcowego.

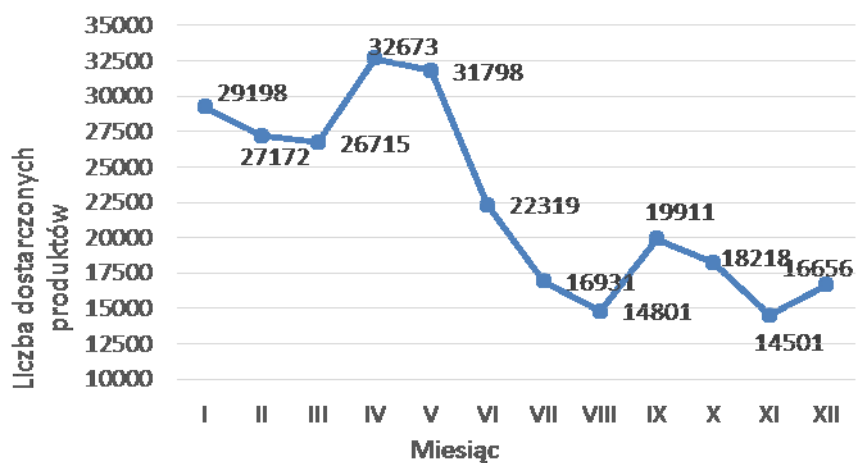
W analizowanym przedsiębiorstwie w ocenie niezawodnościowej realizowanych procesów produkcyjnych wykorzystuje się podejście jakościowe, bazujące na wykorzystaniu przede wszystkim takich metod jak: listy kontrolne, karty kontrolne, analizę Pareto-Lorenza i diagram Ishikawy. Z metod najczęściej wykorzystuje się 5WHY, metodologię 8D w celu łatwego zobrazowania reklamacji oraz metodę FMEA. Jednocześnie miarą nieuszkodzalności jest tzw. wskaźnik nieuszkodzalności (*reliability index*), który odnosi się do liczby zgłoszonych reklamacji przez klientów zewnętrznych (produkty odrzucone przez klientów firmy).

Proces reklamacji w firmie opiera się na metodzie 8D oraz 5D. W momencie pojawienia się reklamacji od klienta, czy też problemu wewnątrz firmy, pierwszym etapem jest zastosowanie działań natychmiastowych. Najczęściej są to kontrole stanów magazynowych w celu sprawdzenia wyrobów pod kątem danej niezgodności oraz spotkanie z pracownikami produkcyjnymi. Największe korzyści osiąga się w chwili wspólnej analizy problemu w grupie. Po jej wykonaniu ustala się przyczyny źródłowe oraz rozwiązuje problem. W raporcie 8D inżynierowie stosują zasadę, żeby odpowiedź reklamacyjna nie trwała dłużej niż 8 godzin. Końcowe rozwiązania raportu nie powinny zająć więcej niż 2 tygodnie.

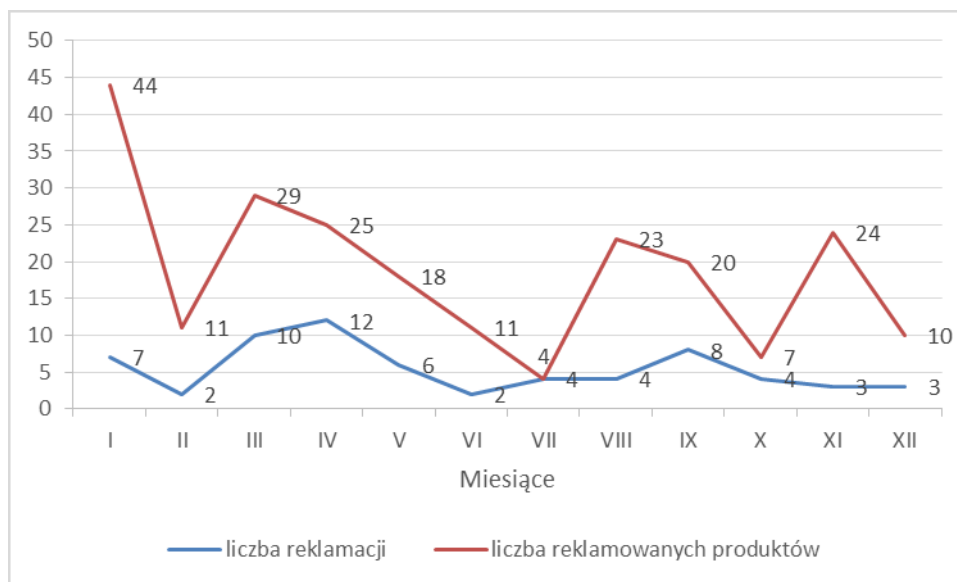
Dane firmy obejmują informacje o liczbie reklamacji (zarówno tych typu zewnętrznego, jak i wewnętrznego), typie wykrytej wady/problemu, datę reklamacji, oraz obszar produkcyjny odpowiedzialny za dany rodzaj wady. Pozwala to na przeprowadzenie wstępnej analizy niezawodnościowej, która ma na celu wykazanie przyczyn wykrytej wady oraz możliwości jej eliminacji (np. naprawy). Opierając się na danych z 2014 r., przeprowadzono wstępną analizę niezawodnościową.

W 2014 r. przedsiębiorstwo dostarczyło do swoich klientów ok. 270 900 produktów (rys. 1).

W badanym okresie odnotowano 65 reklamacji klientów, które odnosiły się do błędów popełnionych w badanym obszarze produkcyjnym. Obejmowały one w sumie 226 sztuk produktów, które nie spełniły wymagań klientów (rys. 2).

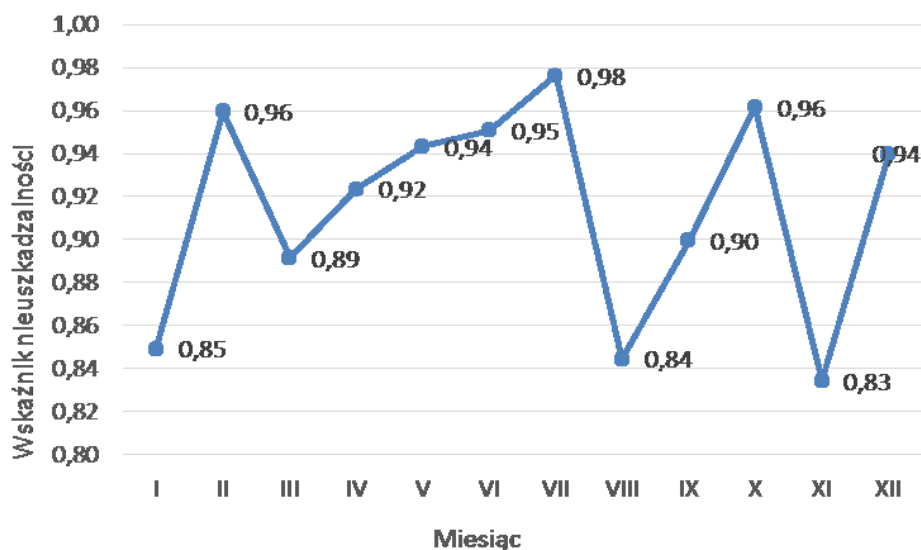


Rys. 1. Liczba produktów dostarczonych do klientów firmy (2014)

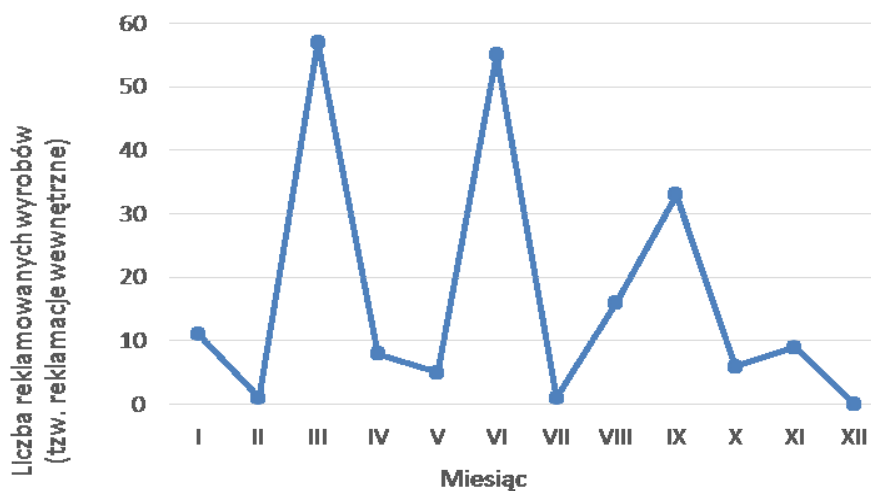


Rys. 2. Liczba reklamacji oraz liczba reklamowanych produktów w badanym obszarze produkcyjnym (2014)

Na podstawie otrzymanych informacji możliwe było wyznaczenie wskaźnika nieuszkodzalności (rys. 3).



Rys. 3. Wskaźnik nieuszkodzalności dla analizowanego obszaru produkcyjnego (2014)



Rys. 4. Liczba reklamowanych wyrobów (tzw. reklamacje wewnętrzne) w 2014 r.

Średni wskaźnik nieuszkodzalności dla danego procesu produkcyjnego wynosi 0,91, a jego wartość jest mocno uzależniona od wysokiej liczby zidentyfikowanych błędów w ramach tzw. reklamacji wewnętrznych (pracownicy produkcyjni wykryli wady przed przesłaniem wyrobu do klienta końcowego) (rys. 4). Poziom wykry-

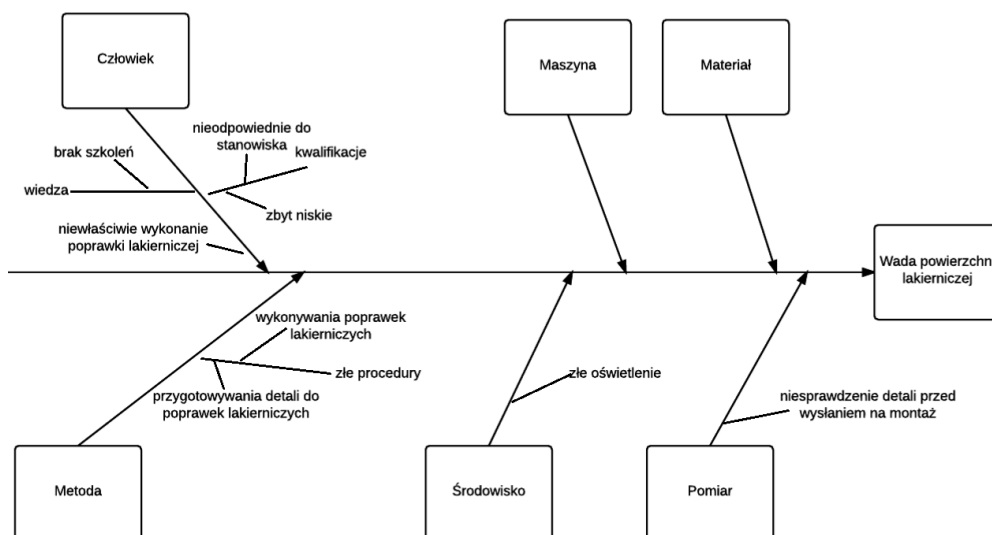
tych błędów w procesie produkcyjnym waha się od 0% w grudniu do 500% w czerwcu (w odniesieniu do liczby reklamacji zewnętrznych).

W kolejnym kroku analizy nieuszkodzalności firma skupia się na poszukiwaniach przyczyn występujących problemów. W tym celu wykorzystywane są takie narzędzia jak analiza Pareto-Lorenza, diagram Ishikawy czy metoda *What if?*

Za pomocą arkusza kontrolnego (tab. 2) przedstawiono defekty występujące podczas malowania proszkowego. Dane zgromadzili pracownicy przedsiębiorstwa, a wyniki opracowano na podstawie reklamacji zewnętrznych oraz informacji od pracowników o wykrytych wadach bezpośrednio w trakcie produkcji.

Tabela 2. Arkusz kontrolny dla danych z okresu 01-06.2014

Malowanie proszkowe obieg II	Ilość reklamowanych części
Wada powierzchni powłoki	32
Nieodpowiednia grubość powłoki	21
Wtrącenia w farbie	14
Brak przyczepności farby	13
Niedomalowania	10
Zamalowany otwór/gwint	7
Za mała średnica otworu po lakierze	4



Rys. 5. Diagram Ishikawy dla wady powierzchni lakierniczej

Do głównych grup czynników mających największy wpływ na badane zjawisko można zaliczyć kolejno: wady powierzchni powłoki, nieodpowiednią grubość powłoki, wtrącenia w farbie i brak przyczepności farby. W pierwszej kolejności należy zająć się właśnie tymi defektami. Występujące niezgodności wypisane powyżej, decydują w ok. 80% o precyzji i wydajności danego obszaru. Zastosowanie działań korygujących właśnie do tych niezgodności przyniesie największe efekty.

Uszkodzona powierzchnia malowanych detali to jeden z większych problemów pojawiających się w trakcie produkcji oraz kontroli u klienta. Wady te występują w różnych formach, można do nich zaliczyć: rybie oczka, krater, pory, igiełkowania, pęcherze, bąble, zgazowania, rozwarstwienie, zacieki, uszkodzenia na skutek napraw, wgniecenia i wgłębienia, zadrapania.

Przykładowa niezgodność wystąpiła w zbiorniku, a wykryto ją u klienta podczas rutynowej kontroli wyrobów. Problemem okazały się zaburzone właściwości estetyczne wyrobu, niezgodne z wymaganiami klienta. Opracowano diagram Ishikawy w celu poznania przyczyn źródłowych wady powierzchni lakierniczej (rys. 5).

W przypadku analizowanego problemu ustalono, że główną przyczyną występowania wady powierzchni lakierniczej są nieodpowiednie kwalifikacje pracownika do stanowiska (A), niesprawdzenie detali przed wysłaniem na montaż (B), oraz niewłaściwe wykonanie poprawki lakierniczej (C). Wszystkie te przyczyny przede wszystkim dotyczą zawodności czynnika ludzkiego.

Ten prosty przykład oceny niezawodnościowej systemu produkcyjnego jest w pełni oparty na podejściu jakościowym i odpowiada prostej analizie wskaźnikowej. Jednocześnie takie kryteria, jak brak opóźnień realizowanych procesów produkcyjnych, właściwa realizacja infrastruktury wspierającej czy wiarygodność informacji nie są uwzględniane. Takie czynniki operacyjne jak np. zawodność maszyn i urządzeń lub czynnik ludzki są analizowane w sposób pośredni z wykorzystaniem m.in. metody What if? czy diagramu Ishikawy.

Rozważając przedstawiony przykład, można zauważyć brak jednej spójnej metody oceny niezawodnościowej procesów produkcyjnych, która obejmowałaby wielokryterialne podejście, była ustandaryzowana oraz oparta o koncepcję ciągłego doskonalenia. Jednocześnie analiza realizowanych procedur oceny jest pierwszym etapem opracowania nowej metody oceny nieuszkodzalności systemów produkcyjnych będącego celem dalszych prac badawczych autorów pracy.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono możliwości wdrożenia wielowymiarowej oceny niezawodnościowej funkcjonowania rzeczywistych systemów produkcyjnych. Możliwości przeprowadzania bardzo szczegółowych analiz niezawodnościowych zwykle są ograniczone dostępnością danych, które zwykle są danymi wrażliwymi (pouf-

nymi) lub niewiarygodnymi (błędne zapisy, niekompletność, brak standaryzacji dokonywanych wpisów).

Artykuł to pierwszy etap opracowania metody oceny niezawodności procesów produkcyjnych, która będzie wspierała managerów w ich codziennej pracy. Biorąc pod uwagę brak obiektywności opinii ekspertów, ograniczony dostęp do niezbędnych danych oraz wiele znanych metod czy modeli oceny niezawodności, autorzy stwierdzają, że ten obszar badawczy nadal wymaga dalszych prac pozwalających na opracowanie kompleksowego podejścia do pomiaru i oceny niezawodności systemów produkcyjnych.

LITERATURA

- Berg, M., Posner, M.J.M., Zhao, H. (1994). Production-Inventory Systems with Unreliable Machines, *Operations Research*, 42(1), 111-118.
- Blumenthal, S., Greenwood, J.A., Herbach, L.H. (1984). Series Systems and Reliability Demonstration Tests. *Operations Research*, 32(3), *Reliability and Maintainability*, 641-648.
- Buzacott, J.A., Yao, D.D. (1986). Flexible Manufacturing Systems: A Review of Analytical Models, *Management Science*, 32(7), 890-905.
- Chakraborty, S., Ankiah, B. (1989). Assessment of manufacturing system reliability: a case study. *Journal of Operational Research Society*, 40(1), 55-63.
- Chen, H., Yao, D.D. (1992). A Fluid Model for Systems with Random Disruptions, *Operations Research*, 40, Supplement 2: Stochastic Processes, S239-S247.
- Chlebus, M., Werbińska-Wojciechowska, S. (w druku). Issues on production process reliability assessment – review. Artykuł przyjęty do druku w materiałach konferencyjnych *IX Konferencji Naukowej Oszczędność i Efektywność – Współczesne rozwiązania w logistyce i produkcji*, 16-18 listopada 2016 r., Poznań.
- Curtin, K.M. (1959). A Monte Carlo approach to evaluate multimoded system reliability *Operations Research*, 7(6), 721-727.
- Dai, W., Maropoulos, P.G., Zhao, Y. (2015). Reliability modelling and verification of manufacturing processes based on process knowledge management. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(1), 98-111.
- Davy, J.A., White, R.E., Merritt, N.J., Gritzmacher, K. (1992). A Derivation of the Underlying Constructs of Just-in-Time Management Systems. *The Academy of Management Journal*, 35(3), 653-670.
- de Maré, J., Rosander, B. (1988). The Production Flow in the Motor Industry: A Case Study of Multistate Reliability Theory. *Scandinavian Journal of Statistics*, 15(1), 51-53.
- Denardo E.V., Lee T.Y.S. (1996). Managing Uncertainty in a Serial Production Line. *Operations Research*, 44(2), 382-392.
- Denardo, E.V., Tang, C.S. (1997). Control of a Stochastic Production System with Estimated Parameters. *Management Science*, 43(9), 1296-1307.
- Dhillon, B.S. (2005). *Reliability, Quality, and Safety for Engineers*. CRC Press, United States of America.

- Dhillon, B.S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineeris*. CRC Press, United States of America.
- Elsayed, E.A. (2000). Perspectives and challenges for research in quality and reliability engineering. *International Journal of Production Research*, 38(9), 1953-1976.
- Fertsch, M., Grzybowska, K., Stachowiak, A. (2011). Models of manufacturing systems – classification framework. *Research in Logistics and Production*, 1(1), 45-51.
- Filus, J. (1986). A Problem in Reliability Optimization. *The Journal of the Operational Research Society*, 37(4), 407-412.
- Graves, T.L., Anderson-Cook, C.M., Hamada, M.S. (2010). Reliability Models for Almost-Series and Almost-Parallel Systems. *Technometrics*, 52(2), 160-171.
- Hamrol, A. (2015). *Strategies and practices of efficient performance* (in Polish). Warsaw: PWN Publishing House.
- Hosford, J.E. (1960). Measures of Dependability. *Operations Research*, 8, (1), 53-64.
- Iravani, S.M.R., Duenyas, I., Olsen, T.L. (2000). A Production/Inventory System Subject to Failure with Limited Repair Capacity. *Operations Research*, 48(6), 951-964.
- Jodejko-Pietruczuk, A., Plewa, M. (2014). Components' rejuvenation in production with reused elements. *International Journal of Performability Engineering*, 10(6), 567-575.
- Kao, C. (2012). Efficiency decomposition for parallel production systems. *The Journal of the Operational Research Society*, 63(1), 64-71.
- Lefkowitz, I. (1977). Integrated Control of Industrial Systems, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 287(1346). A Discussion on the Use of Operational Research and Systems Analysis in Decision- Making, 443-465.
- Lin, Y-K., Chang, P-Ch. (2012). System reliability of a manufacturing network with reworking action and different failure rates. *International Journal of Production Research*, 50(23), 6930-6944.
- Lin, Y-K., Chang, P-Ch. (2013). Reliability assessment for a stochastic manufacturing system with reworking actions, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 36(3), 382-390.
- Lodding, H., Nyhuis, P., Schmidt, M., Kuyumcu, A. (2014). Modelling lateness and schedule reliability: how companies can produce on time. *Production Planning and Control*, 25(1), 59-72.
- Louit, D., Pascual, R., Banjevic, D., Jardine, A.K.S. (2011). Optimization models for critical spare parts inventories — a reliability approach. *The Journal of the Operational Research Society*, 62(6), 992-1004.
- Mayne, A.J. (1960). Some Reliability Models of Production Lines, with Special Reference to Computer Operation and Scheduling. *Operational Research*, 11(1/2), 16-30.
- Meyer, R.R., Rothkopf, M.H., Smith, S.A. (1979). Reliability and Inventory in a Production-Storage System, *Management Science*, 25(8), 799-807.
- Moinzadeh, K., Aggarwal, P. (1997). Analysis of a Production/Inventory system subject to random disruptions. *Management Science*, 43(11), 1577-1588.
- Moinzadeh, K., Klastorin, T.D. (1995). Measuring the Impact of a Delay Buffer on Quality Costs with an Unreliable Production Process. *Management Science*, 41(3), 513-523.
- Myszewski, J.M. (2011). On effectiveness of the control of production process. *Research in Logistics and Production*, 1(1), 5-15.

- Nowakowski, T. (2006). Analysis of possibilities of logistic system reliability assessment, In proc. symp.: *ESREL 2006 Conference*. Estoril, 18-22 September 2006. Estoril: Balkema.
- Pan, W., So, K.C. (2010). Optimal Product Pricing and Component Production Quantities for an Assembly System Under Supply Uncertainty. *Operations Research*, 58(6), 1792-1797.
- Plewa, M. (2009). Assessment of influence of products' reliability on remanufacturing processes. *International Journal of Performability Engineering*, 5(5), 463-470.
- Savage, G.J., Carr, S.M. (2001). Interrelating Quality and Reliability in Engineering Systems. *Quality Engineering*, 14(1), 137-152.
- Szwedzka, M., Jasiulewicz-Kaczmarek, M. (2011). Determining maintenance services using production performance indicators. *Research in Logistics and Production*, 6(4), 361-374.
- Tsarouhas, P. (2012). Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 47, 2243-2251.
- Tsou, J-C., Chen, J-M. (2005). Dynamic model for a defective production system with Poka-Yoke. *Journal of the Operational Research Society*, 56, 799-803.
- Tubis, A. (2010). The Potentials in the Integration of Planning Enterprise Activity, *Logistics and Transport*, 2010/1, 105-113.

SELECTED ISSUES IN PRODUCTION PROCESS RELIABILITY ASSESSMENT

Summary

In the paper, the authors focus on the problem of reliable performance of production processes. Reliability analyses of production systems involve considering many different factors and requirements. Therefore, based on the authors' developed multidimensional definition of production process reliability, a brief literature review in reliability engineering of production systems is provided. Next, a short case study indicates the implementation possibilities of the developed approach. The work ends with a summary and directions for further research.

Keywords: production process, reliability assessment, case study