

ppłk dr inż. Małgorzata GRZELAK

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego

malgorzata.grzelak@wat.edu.pl

ORCID: 0000-0001-6296-7098

ZASTOSOWANIE METODY FMEA DO ELIMINACJI PRZYCZYŃ BŁĘDÓW W PROCESACH WYTWÓRCZYCH W KONTEKŚCIE POPRAWY BEZPIECZEŃSTWA OPERACYJNEGO

APPLICATION OF THE FMEA METHOD FOR ELIMINATING THE CAUSES OF ERRORS IN MANUFACTURING PROCESSES IN THE CONTEXT OF IMPROVING OPERATIONAL SAFETY

Streszczenie

W artykule dokonano charakterystyki roli bezpieczeństwa operacyjnego w przedsiębiorstwach produkcyjnych, definiowanego jako zdolność do prowadzenia procesów w sposób niezakłócony i akceptowalny pod względem ryzyka. Szczególną uwagę zwrócono na potrzebę wczesnej identyfikacji i eliminacji przyczyn błędów w warunkach rosnącej złożoności systemów technicznych i zaostrzających się wymagań jakościowych. Celem artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania metody FMEA do identyfikacji potencjalnych niezgodności w procesach wytwórczych oraz oceny ich wpływu na bezpieczeństwo operacyjne przedsiębiorstwa. Omówiono podstawy teoretyczne metody, sposób wyznaczania wskaźnika priorytetu ryzyka RPN oraz jego wykorzystanie do priorytetyzacji działań korygujących i zapobiegawczych. W studium przypadku, na przykładzie producenta rowerów, zidentyfikowano kluczowe niezgodności w procesach produkcji ram, kół i kierownic oraz określono ich skutki oraz przyczyny. Na tej podstawie wskazano czynności krytyczne oraz zaproponowano działania doskonalące ukierunkowane na redukcję ryzyka, wzrost wykrywalności błędów i ograniczenie skutków zakłóceń, podkreślając znaczenie FMEA jako narzędzia wspierającego bezpieczeństwo operacyjne.

Słowa kluczowe: FMEA, procesy wytwórcze, redukcja ryzyka, bezpieczeństwo operacyjne

Abstract

The article characterizes the role of operational safety in manufacturing enterprises, defined as the ability to carry out processes in an uninterrupted manner and at an acceptable level of risk. Particular attention is paid to the need for early identification and elimination of the causes of errors under conditions of increasing complexity of technical systems and tightening quality requirements. The aim of the article is to present the possibilities of applying the FMEA method to identify potential nonconformities in manufacturing processes and to assess their impact on the operational safety of the enterprise. Theoretical foundations of the method are discussed, as well as the method of determining the Risk Priority Number (RPN) and its use for the prioritization of corrective and preventive actions. In the case

study, using the example of a bicycle manufacturer, key nonconformities in the production processes of frames, wheels and handlebars were identified, and their effects and causes were determined. On this basis, critical activities were indicated and improvement actions were proposed, aimed at reducing risk, increasing the detectability of errors and limiting the effects of disruptions, thereby emphasizing the importance of FMEA as a tool supporting operational safety.

Key words: FMEA, manufacturing processes, risk reduction, operational safety

Wstęp

Bezpieczeństwo operacyjne można zdefiniować jako stan oraz zdolność organizacji do prowadzenia procesów w sposób niezakłócony oraz akceptowalny pod względem ryzyka, przy jednoczesnej ochronie przed skutkami zagrożeń wynikających z działalności operacyjnej. Obejmuje ono zarówno właściwe projektowanie i eksploatację systemów technicznych oraz procesów, jak i stosowanie odpowiednich procedur organizacyjnych, środków technicznych i działań prewencyjnych minimalizujących prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń niepożądanych oraz ograniczających ich skutki, jeśli do nich dojdzie¹.

W odniesieniu do przedsiębiorstw produkcyjnych bezpieczeństwo to w coraz większym stopniu zależy od zdolności do wczesnej identyfikacji i skutecznego eliminowania przyczyn błędów w procesach wytwórczych². W warunkach rosnącej złożoności systemów technicznych, zaostrzających się wymagań jakościowych, jak również rosnącej konkurencji, incydenty wynikające z zakłóceń procesu mogą prowadzić nie tylko do strat ekonomicznych, lecz także do poważnych zagrożeń dla zdrowia i życia pracowników oraz użytkowników wyrobów³. Z tego względu szczególnego znaczenia nabierają metody systematycznej oceny przyczyn błędów i ich potencjalnych skutków, pozwalające na proaktywne zarządzanie ryzykiem w całym cyklu życia wyrobu. Wykorzystanie takich podejść, jak analiza przyczyn i skutków wad, umożliwia nie tylko klasyfikację i priorytetyzację zagrożeń, lecz również ukierunkowanie działań doskonalących na obszary o najwyższym poziomie ryzyka. W konsekwencji metody oceny przyczyn błędów stają się kluczowym narzędziem wspierającym podejmowanie decyzji w obszarze bezpieczeństwa operacyjnego, integrując wymagania jakościowe z wymogami niezawodności i ochrony pracowników⁴.

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania metody FMEA (ang. Failure Mode and Effects Analysis) do identyfikacji przyczyn błędów w procesach wytwórczych w aspekcie bezpieczeństwa operacyjnego przedsiębiorstwa. Aby

1 Valaki J.B., Rathod P.P., *Environmental impact, personnel health and operational safety aspects of electric discharge machining: A review*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture” 2015.

2 Liu P., *Risk assessment based on failure mode and effects analysis: A case study in process industries*, „Reliability Engineering & System Safety” 2023.

3 Demirkaya F., *FMEA application in production processes and its effects to product and process quality*, „Polish Journal of Management Studies” 2022.

4 Hii D.H., *Synergizing FMEA and PDCA for superior risk management in semiconductor manufacturing*, „International Journal of Production Management and Engineering”, 2024.

osiągnąć zamierzony cel, w pierwszym kroku przedstawiono teoretyczne podstawy zaproponowanej metody, a następnie dokonano charakterystyki badanego podmiotu oraz szczegółowej analizy realizowanego procesu wytwórczego. Na tej podstawie zidentyfikowano kluczowe przyczyny błędów oraz przedstawiono wnioski.

Charakterystyka metody FMEA jako narzędzia wspierającego zapewnienie bezpieczeństwa operacyjnego przedsiębiorstwa

W niniejszym opracowaniu do identyfikacji i oceny przyczyn powstawania błędów w procesach wytwórczych wykorzystano metodę FMEA. Jest to analiza przyczyn i skutków wad produktów i procesów, która stosowana jest w celu zapobiegania ich występowania poprzez ich wykrywanie jeszcze na etapie projektowania. Analiza FMEA może być przeprowadzana zarówno dla procesu, jak i dla produktu⁵. Na poziomie produktu analiza ta może być przeprowadzana w jednym z trzech etapów cyklu życia wyrobów, tj. projektowania przed wdrożeniem do produkcji lub późniejszych.

Metoda jest najbardziej efektywna na etapie projektowania, ponieważ w tym okresie kształtowane są jeszcze kluczowe parametry wyrobu i relatywnie łatwo jest wprowadzić zmiany eliminujące potencjalne błędy. Na etapie bezpośrednio poprzedzającym wdrożenie do produkcji skuteczność analizy jest już mniejsza, gdyż gotowy projekt narzuca określone ograniczenia dla możliwych modyfikacji. W późniejszych fazach cyklu życia produktu uzyskiwane korzyści z zastosowania analizy są znikome, ponieważ zasadnicze cechy wyrobu zostały już ustalone. W takiej sytuacji zasadne jest przeprowadzenie FMEA przed najbliższą aktualizacją konstrukcji, tak aby wypracowane usprawnienia mogły zostać uwzględnione w nowej wersji produktu⁶.

Metoda FMEA sprzyja doskonaleniu wyrobu, ponieważ zakłada systematyczne i cykliczne analizowanie potencjalnych wad oraz niezgodności, a następnie formułowanie działań doskonalących. Prowadzi to nie tylko do eliminowania samych zagrożeń, lecz także do poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych i procesowych. W efekcie wprowadzane modyfikacje mogą podnosić ogólną funkcjonalność i jakość produktu. Tym samym wyrób staje się bardziej atrakcyjny dla użytkownika, zarówno pod względem parametrów użytkowych, jak i niezawodności⁷.

Metoda FMEA może także być wykorzystywana w celu usprawnienia procesów, zarówno podczas ich wdrażania, jak również do doskonalenia już istniejących. Procedura obejmuje 10 kroków postępowania⁸:

- identyfikacja czynności i elementów wchodzących w skład procesu,

5 R. J. Mikulak, R. McDermott, M. Beauregard, *The Basics of FMEA*, Taylor & Francis Group, 2017.

6 Zhan S. i in., *Application of Failure Mode and Effects Analysis to Improve the Development of a Clinical Trial System*, „JMIR Medical Informatics”, 2024.

7 K. Janisz, A. Mikulec, *Analiza FMEA wybranego procesu logistycznego*, „Logistyka” 2017, 6, 1389-1393.

8 Al-dalain R., Beithou N., Khalid M. B., Borowski G., & Alsaqoor S. (2024). Enhanced Approach for Prioritisation of Failures in Failure Mode and Effects Analysis Under Uncertainty. *Advances in Science and Technology*. Research Journal, 18(6).

- sporządzenie listy potencjalnych błędów,
- identyfikacja prawdopodobnych skutków dla odnalezionych błędów,
- wskazanie możliwych do zaistnienia przyczyn potencjalnych błędów,
- oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia potencjalnych niezgodności,
- oszacowanie prawdopodobieństwa wykrycia poszczególnych błędów,
- określenie znaczenia wystąpienia błędu dla prawidłowej realizacji procesu,
- obliczenie wskaźnika priorytetu ryzyka RPN (ang. risk priority number) i interpretacja jego wyników,
- wskazanie błędów wymagających podjęcia działań łagodzących lub eliminujących ich skutki,
- wskazanie działań korygujących.

We wskazanej procedurze wskaźnik RPN dla analizowanych czynności obliczany jest zgodnie z zależnością⁹ (1):

$$RPN=R \cdot W \cdot Z, \quad (1)$$

gdzie:

R - prawdopodobieństwa wystąpienia niezgodności,

W - prawdopodobieństwa wykrycia przyczyn niezgodności,

Z - znaczenie wystąpienia niezgodności dla procesu.

Powyższe wskaźniki określone są przy użyciu dedykowanej skali zgodnie z tabelami 1-3.

Tabela 1. Skala do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia niezgodności R

Prawdopodobieństwo wystąpienia	Częstość	Ocena
zerowe	0	1
bardzo małe	1/4500	2
	1/450	3
małe	1/100	4
	1/60	5
	1/45	6
średnie	1/20	7
	1/10	8
wysokie	1/5	9
	1/2	10

Źródło: opracowanie własne.

⁹ Ibidem.

Tabela 2. Skala do oszacowania prawdopodobieństwa wykrycia przyczyn niezgodności W

Prawdopodobieństwo wykrycia	Opis	Ocena
minimalne	wada procesu jest ukryta, brak procedur i urządzeń kontrolnych umożliwiających wykrycie tej wady	1
bardzo niewielkie	wada niejawna, brak procedur i urządzeń kontrolnych umożliwiających wykrycie tej wady	2
niewielkie	wada jawna, brak procedur i urządzeń kontrolnych	3
małe	wada jawna	4
umiarkowane	kolejna czynność ma charakter kontrolny	5
średnie	stanowisko wyposażone w system weryfikujący, kolejna czynność ma charakter kontrolny	6
znaczne	następna czynność ma charakter kontrolny ze stanowiskiem pomiarowo-kontrolnym	7
wysokie	istnieje procedura weryfikująca	8
bardzo wysokie	stanowisko wyposażone w system weryfikujący	9
pewne	wada oczywista	10

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3. Skala oceny znaczenia niezgodności dla procesu Z

Ocena	Kryteria oceny
1	Niezgodność nieznaczna – nie wpływa w żadnym stopniu na realizację procesu i odbiór przez klienta
2	Niezgodność nieznaczna – nie wpływa w żadnym stopniu na realizację procesu jednak może wpływać na odbiór klienta
3	Niezgodność o małym znaczeniu – wpływa na czas realizacji procesu, ale istnieje możliwość działań korygujących w celu jej usunięcia przed zakończeniem procesu w czasie
4	Niezgodność o niewielkim znaczeniu – wpływa na czas realizacji i nie istnieje możliwość działań korygujących w celu jej usunięcia przed zakończeniem procesu w czasie

5	Niezgodność o niewielkim znaczeniu – wpływa na efekt i koszt realizacji procesu, jednak istnieje możliwość działań korygujących w celu jej usunięcia i skorygowania efektu procesu
6	Niezgodność o średnim znaczeniu – wpływa na efekt i koszt realizacji procesu i nie istnieje możliwość działań korygujących
7	Niezgodność o znacznym znaczeniu – wpływa na czas, efekt i koszt realizacji procesu i nie istnieje możliwość działań korygujących
8	Niezgodność o dużym znaczeniu – zatrzymuje realizację procesu i wymusza jego korektę
9	Niezgodność o bardzo dużym znaczeniu – zatrzymuje całkowicie realizację procesu i uniemożliwia jego korektę
10	Niezgodność o krytycznym znaczeniu – może doprowadzić do uszkodzenia procesu i wpływa na markę firmy

Źródło: opracowanie własne.

Działania korygujące bądź zapobiegawcze mogą zostać podjęte w trzech kierunkach: zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia błędu, zwiększenie wykrywalności wady, redukcja znaczenia skutków. Wybór kierunku i konkretnego działania zależy od stopnia skomplikowania problemu, procesu i produktu¹⁰. Zastosowanie metody FMEA przynosi przedsiębiorstwom wiele korzyści, wśród których wyszczególnić należy: poprawę jakości i efektywności, obniżenie kosztów, wzrost zadowolenia klientów¹¹.

Zastosowanie metody FMEA do zapewnienia bezpieczeństwa operacyjnego – studium przypadku

Analizie poddano przedsiębiorstwo, które jest jednym z największych polskich producentów rowerów, rozwijającym działalność od początku lat 90. XX wieku. Koncentruje się na projektowaniu i wytwarzaniu szerokiej gamy produktów, obejmującej rowery górskie, szosowe, miejskie, trekkingowe, elektryczne oraz modele dla dzieci. Firma posiada nowoczesny zakład produkcyjny w kraju, w którym realizuje również zaawansowane technologicznie ramy, w tym konstrukcje z włókna węglowego. Produkty tej marki są dostępne zarówno na rynku krajowym, jak i w wielu krajach zagranicznych, co świadczy o jej ugruntowanej pozycji w europejskiej branży rowerowej¹².

Główne zadania realizowane przez przedsiębiorstwo obejmują produkcję rowerów oraz ich części, sprzedaż rowerów i akcesoriów, a także obsługę posprzedażową, w tym rozpatrywanie reklamacji i serwisowanie wyrobów. Hala produkcyjna podzielona jest na kilka wyspecjalizowanych stref: halę montażową z czterema liniami

¹⁰ H. Wyrębek, *Znaczenie metody FMEA w zarządzaniu jakością w przedsiębiorstwach*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach. Seria: Administracja i Zarządzanie” 2012, nr 92.

¹¹ K. Kowalik, *Failure Mode and Effects Analysis in theory and practice of quality management*, Archives Of Engineering Knowledge, Vol.3, Issue 2, 2018.

¹² <https://kross.pl/swiat-kross> (data dostępu: 03.02.2026)

montażowymi, spawalnię ram i widelców, obręczownię, lakiernię oraz linię produkcji kół. Przedsiębiorstwo posiada również własny magazyn, w którym składowane są zarówno komponenty pozyskiwane od dostawców zewnętrznych (m.in. opony, dętki, szprychy, dzwonki, gumowe nakładki na rączki kierownicy), jak i wyprodukowane już rowery oraz części rowerowe.

Przepływ materiałów i wyrobów pomiędzy poszczególnymi stanowiskami na hali produkcyjnej realizowany jest z wykorzystaniem różnych środków transportu wewnętrznego. Większość elementów przemieszczana jest na hakach, na których zawieszają się m.in. ramy czy koła i kieruje do kolejnych stref procesu. Uzupełniająco stosowane są przenośniki rolkowe oraz wózki widłowe, przy czym te ostatnie wykorzystywane są głównie do transportu gotowych, najczęściej już zapakowanych rowerów, kierowanych do wysyłki do punktów sprzedaży. Cały proces wytwórczy rozpoczyna się od przygotowania poszczególnych komponentów, a następnie prowadzi do ich stopniowego łączenia aż do uzyskania kompletnego wyrobu na końcowej taśmie produkcyjnej¹³.

Metodę FMEA wykorzystano do oceny procesu produkcji roweru i wykrycia potencjalnych błędów, jakie mogą zaistnieć w wyszczególnionych etapach produkcji. W pierwszym etapie zidentyfikowano potencjalne niezgodności i ich skutki, a także przyczyny powstania niezgodności (tabela 4).

Tabela 4. Potencjalne niezgodności w procesie

Proces	Czynność	Potencjalna niezgodność	Potencjalny skutek	Potencjalna przyczyna
Produkcja ramy	Dostarczenie ram przez producenta zewnętrznego	Dostarczenie błędnych ram	Zwiększony czas trwania procesu	Złożenie błędnego zamówienia/błąd po stronie podwykonawcy
	Malowanie ramy proszkiem lakierniczym	Pomalowanie niewłaściwym kolorem	Konieczność ponownego malowania ramy – wydłużenie czasu trwania procesu	Umieszczenie niewłaściwego koloru w maszynie
	Malowanie ramy proszkiem lakierniczym	Nierównomierne pokrycie kolorem	Konieczność ponownego malowania ramy/wycofanie wadliwej partii	Błąd/zużycie maszyny/niska jakość farb

¹³ A. Winnik, *Wybrane aspekty funkcjonowania przedsiębiorstw produkcyjnych*, praca dyplomowa, Warszawa 2023.

	Oklejanie ramy szablonami	Oklejanie niewłaściwych elementów	Produkcja partii niezgodnej z założeniami projektowymi	Błędnie wydrukowane szablony/błąd pracownika
	Oklejanie naklejkami	Oklejanie niewłaściwymi naklejkami/w niewłaściwych miejscach	Produkcja partii niezgodnej z założeniami projektowymi	Błąd ludzki
Produkcja koła	Profilowanie obręczy	Obręcz o niewłaściwych wymiarach	Brak obręczy o pożądanym rozmiarze	Niepoprawne sparametryzowanie maszyny
	Cięcie obręczy	Zbyt wąska/szeroka obręcz	Konieczność ponownego cięcia obręczy/wycofanie wadliwej partii	Niepoprawne sparametryzowanie maszyny
	Wiercenie otworów w obręczy	Zbyt głębokie/płytkie otwory	Konieczność ponownego nawiercania/wycofanie wadliwej partii	Niepoprawne sparametryzowanie maszyny
	Łączenie profilu w obręcz	Zbyt lekkie dociśnięcie końców obręczy	Konieczność ponownego łączenia profilu	Niepoprawne sparametryzowanie maszyny
	Przygotowanie piasty ze szprychami	Umieszczenie niewystarczającej liczby szprych	Konieczność uzupełnienia brakujących szprych	Błąd ludzki
	Naciąganie szprych	Niewystarczające naciągnięcie szprych	Konieczność ponownego naciągania – wydłużenie czasu trwania procesu	Niepoprawne sparametryzowanie maszyny
	Centrowanie koła	Niedocentrowanie koła	Konieczność ponownego centrowania – wydłużenie czasu trwania procesu	Niepoprawne sparametryzowanie maszyny
Produkcja kierownicy	Umieszczanie akcesoriów	Umieszczenie akcesoriów niezgodnych z założeniami projektowymi	Konieczność zmiany akcesoriów na właściwe - wydłużenie czasu trwania procesu	Błąd ludzki

Źródło: Opracowanie własne.

W dalszej części przeprowadzono ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych niezgodności, ich wykrywalności oraz znaczenia dla analizowanego procesu. Kryteria oceny przyjęto zgodnie z założeniami przedstawionymi w tabelach 1–3. Na podstawie uzyskanych wartości obliczono wskaźnik priorytetu ryzyka (RPN). Zestawienie wyników oceny oraz przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie ocen prawdopodobieństw wystąpienia, wykrywalności, znaczenia dla procesu i wskaźnika RPN

Proces	Czynność	Potencjalna niezgodność	W	R	Z	RPN
Produkcja ramy	Dostarczenie ram przez producenta zewnętrznego	Dostarczenie błędnych ram	3	8	9	216
	Malowanie ramy proszkiem lakierniczym	Pomalowanie niewłaściwym kolorem	7	4	8	224
	Malowanie ramy proszkiem lakierniczym	Nierównomierne pokrycie kolorem	6	4	5	120
	Oklejanie ramy szablonami	Oklejenie niewłaściwych elementów	5	4	7	140
	Oklejanie naklejkami	Oklejenie niewłaściwymi naklejkami/w niewłaściwych miejscach	5	4	4	80
Produkcja koła	Profilowanie obręczy	Obręcz o niewłaściwych wymiarach	3	5	4	60
	Cięcie obręczy	Zbyt wąska/szeroka obręcz	5	5	4	100
	Wiercenie otworów w obręczy	Zbyt głębokie/płytkie otwory	5	5	4	100
	Łączenie profilu w obręcz	Zbyt lekkie dociśnięcie końców obręczy	5	5	4	100
	Przygotowanie piasty ze szprychami	Umieszczenie niewystarczającej liczby szprych	4	3	7	84

	Naciąganie szprych	Niewystarczające naciągnięcie szprych	2	9	4	72
	Centrowanie koła	Niedocentrowanie koła	3	9	3	81
Produkcja kierownicy	Umieszczanie akcesoriów	Umieszczenie akcesoriów niezgodnych z założeniami projektowymi	5	7	8	280

Źródło: Opracowanie własne.

Potencjalne niezgodności uszeregowano w kolejności malejącej według wartości wskaźnika priorytetu ryzyka (RPN) i przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Czynności krytyczne procesu wraz ze wskaźnikiem RPN

Czynność	RPN
Umieszczanie akcesoriów	280
Malowanie ramy proszkiem lakierniczym	224
Dostarczenie ram przez producenta zewnętrznego	216
Oklejanie ramy szablonami	140
Malowanie ramy proszkiem lakierniczym	120
Cięcie obręczy	100
Wiercenie otworów w obręczy	100
Łączenie profilu w obręcz	100
Przygotowanie piasty ze szprychami	84
Centrowanie koła	81
Oklejanie naklejkami	80
Naciąganie szprych	72
Profilowanie obręczy	60

Źródło: opracowanie własne.

Wartość wskaźnika RPN przekroczyła poziom 200 dla trzech spośród trzynastu analizowanych czynności. Dotyczy to operacji: umieszczania akcesoriów, malowania ramy metodą proszkową oraz dostarczania ram przez producenta zewnętrznego. Wskazane jest podjęcie działań zapobiegawczych, mających na celu ograniczenie prawdopodobieństwa wystąpienia niezgodności.

Na podstawie przeprowadzonej analizy FMEA zaproponowano wprowadzenie działań doskonalących w procesach produkcji ramy i kierownicy, ukierunkowanych na ograniczenie ryzyka wystąpienia niezgodności. W odniesieniu do procesu produkcji ramy wskazane jest wdrożenie dodatkowej kontroli poprawności danych podczas składania zamówień oraz weryfikacji potwierdzeń przesyłanych przez dostawcę, co pozwoli zminimalizować ryzyko dostarczenia niewłaściwych komponentów. Uzupełnieniem tych działań może być dywersyfikacja źródeł zaopatrzenia, zwiększająca odporność systemu na błędy dostawców. W celu zapobieżenia niezgodnościom związanym z procesem malowania ram zaleca się wprowadzenie obowiązkowej kontroli rodzaju stosowanych farb oraz dokumentowania potwierdzenia ich zgodności z wymaganiami projektowymi. W przypadku procesu montażu akcesoriów na kierownicy należy zwrócić szczególną uwagę na właściwą organizację stanowiska pracy, kontrolę poprawności dostarczanych elementów oraz wzmocnienie nadzoru i samokontroli pracowników poprzez stosowanie wizualizacji i bieżącą weryfikację zgodności wykonywanych czynności z projektem.

Podsumowanie

Współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne funkcjonują w warunkach wysokiej złożoności procesów technologicznych i zaostrzających się wymagań jakościowych, co stawia przed nimi wyzwanie utrzymania bezpieczeństwa operacyjnego na odpowiednim poziomie. Bezpieczeństwo to należy rozumieć jako zdolność organizacji do prowadzenia procesów w sposób niezakłócony i kontrolowany pod względem ryzyka, przy równoczesnej minimalizacji skutków potencjalnych zagrożeń. Kluczowe staje się zatem wdrażanie narzędzi umożliwiających wczesną identyfikację przyczyn błędów i skuteczne eliminowanie ich źródeł, co pozwala na proaktywne zarządzanie ryzykiem w całym cyklu życia produktu.

Celem artykułu było przedstawienie możliwości zastosowania metody FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) w identyfikacji zagrożeń i doskonaleniu procesów produkcyjnych w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa operacyjnego przedsiębiorstwa. Przeprowadzona analiza wskazała, że metoda ta pozwala nie tylko klasyfikować potencjalne niezgodności, lecz także hierarchizować je pod kątem priorytetu ryzyka, co wspiera podejmowanie decyzji o kierunkach działań doskonalących.

Dzięki temu możliwe staje się ukierunkowanie wysiłków organizacyjnych oraz zasobów technicznych na te obszary procesów, które w największym stopniu wpływają na niezawodność, jakość i bezpieczeństwo realizacji.

Wykorzystanie metody FMEA w badanym przedsiębiorstwie umożliwiło wskazanie krytycznych etapów procesu wytwórczego i opracowanie skutecznych działań korygujących. Dla obszarów o najwyższych wartościach wskaźnika RPN, takich jak montaż akcesoriów, malowanie ram i dostarczanie komponentów, zaproponowano wdrożenie dodatkowych kontroli, weryfikacji danych oraz dywersyfikację dostaw. Wyniki analizy potwierdzają, że metoda FMEA stanowi efektywne narzędzie wspierające utrzymanie i rozwój bezpieczeństwa operacyjnego, łącząc aspekty jakościowe i organizacyjne z wymogami niezawodności technicznej procesów produkcyjnych.

Bibliografia

Al-dalain R., Beithou N., Khalid M. B., Borowski G. & Alsaqoor S. (2024). *Enhanced Approach for Prioritisation of Failures in Failure Mode and Effects Analysis Under Uncertainty*. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 18(6).

Demirkaya F., *FMEA application in production processes and its effects to product and process quality*, „Polish Journal of Management Studies” 2022.

Hii D.H., *Synergizing FMEA and PDCA for superior risk management in semiconductor manufacturing*, „International Journal of Production Management and Engineering” 2024.

<https://kross.pl/swiat-kross> (data dostępu: 03.02.2026)

Janisz K., Mikulec A., *Analiza FMEA wybranego procesu logistycznego*, „Logistyka” 2017, 6, 1389-1393.

Kowalik K., *Failure Mode and Effects Analysis in theory and practice of quality management*, *Archives Of Engineering Knowledge*, Vol. 3, Issue 2, 2018.

Liu P., *Risk assessment based on failure mode and effects analysis: A case study in process industries*, „Reliability Engineering & System Safety” 2023.

Mikulak R. J., McDermott R., Beaugard M., *The Basics of FMEA*, Taylor & Francis Group, 2017.

Valaki J.B., Rathod P.P., *Environmental impact, personnel health and operational safety aspects of electric discharge machining: A review*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture”, 2015

Winnik A., *Wybrane aspekty funkcjonowania przedsiębiorstw produkcyjnych*, praca dyplomowa, Warszawa 2023.

Wyřbek H., *Znaczenie metody FMEA w zarządzaniu jakością w przedsiębiorstwach*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach. Seria: Administracja i Zarządzanie”, 2012, nr 92.

Zhan S. i in., *Application of Failure Mode and Effects Analysis to Improve the Development of a Clinical Trial System*, „JMIR Medical Informatics” 2024.