

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
im. Tadeusza Kościuszki
Katedra Informatyki Stosowanej

Praca doktorska

**Zmodyfikowana analiza FMEA na
przykładzie układów hydraulicznych**

Joanna Fabiś - Domagała

Promotor:

dr hab. inż. Jacek Pietraszek, prof. PK

Kraków 2024

Spis treści

1	Wstęp	5
2	Tezy, zakres pracy oraz uzasadnienie podjęcia tematu	7
2.1	Cel pracy	7
2.2	Tezy pracy	7
2.3	Zakres realizacji pracy	7
2.4	Uzasadnienie podjęcia tematu pracy	8
3	Analiza źródłowa tematu	10
3.1	Podstawy analizy FMEA.....	10
3.2	Narzędzia wspomagające analizę FMEA.....	15
3.2.1	Diagram Ishikawy	15
3.2.2	Diagram systematyki	16
3.2.3	Metoda 5 why	17
3.3	Ocena ryzyka w analizie FMEA (RPN).....	19
3.4	Podstawowe problemy analizy FMEA.....	21
3.4.1	Liczba ryzyka RPN	22
3.4.2	Konwersja oceny jakościowej na ilościową	22
3.4.3	Czynniki wpływające na ocenę czynników S, O, D	23
3.5	Metody eliminacji podstawowych wad analizy FMEA.....	23
4	Metodyka i technika pracy własnej	25
4.1	Badania ankietowe	25
4.2	Wyniki badań ankietowych.....	29
4.3	Zmodyfikowana analiza FMEA	30
4.3.1	Podstawowe założenia	30
4.3.2	Opis zmodyfikowanej analizy FMEA	30
4.3.3	Ocena znaczenia skutku wady	32
4.3.4	Analiza wrażliwości wskaźnika znaczenia skutków wady.....	34
4.3.5	Subiektywne prawdopodobieństwo wystąpienia wady	35
4.3.6	Ocena możliwości wykrycia wady	38
4.3.7	Ocena kosztów występowania wady	38
4.3.8	Ocena krytyczności	39
4.3.9	Narzędzia zmodyfikowanej analizy FMEA.....	41

5	Przykład zastosowania zmodyfikowanej analizy FMEA	45
5.1	Analiza FMEA układu hydraulicznego.....	45
5.1.1	Opis układu hydraulicznego	45
5.1.2	Elementy układu hydraulicznego.....	48
5.2	Zmodyfikowana analiza FMEA	54
5.2.1	Typowe wady elementów układów hydraulicznych.....	54
5.2.2	Analiza siłownika hydraulicznego.....	61
5.2.3	Analiza układu hydraulicznego.....	68
5.3	Ocena wyników opracowanej analizy FMEA.....	78
5.3.1	Analiza siłownika hydraulicznego	78
5.3.2	Analiza układu hydraulicznego.....	79
6	Podsumowanie.....	80
6.1	Wnioski utylitarne	82
6.2	Wnioski przyszłościowe.....	82
7	Bibliografia.....	83
8.	Spis rysunków	90
9.	Spis tabel	91

Wykaz oznaczeń stosowanych w pracy

FMEA	analiza przyczyn i skutków wad
S	wskaźnik ważności wady
O	wskaźnik prawdopodobieństwa wystąpienia wady
D	wskaźnik wykrycia wady
RPN	liczba ryzyka
ARP _N	alternatywna liczba ryzyka
e_i	elementy systemu
f_i	funkcje systemu
E_i	klasa elementu systemu
e_f	współczynnik korekcyjny klasy elementu
f_e	liczba funkcji realizowanych przez element
W_i	klasa wady
w_i	współczynnik korekcyjny klasy wady
S_c	sumaryczny wskaźnik znaczenia wady
S_{fg}	wskaźnik znaczenia wady gdy system realizuje funkcje główne
S_{fd}	wskaźnik znaczenia wady gdy system realizuje funkcje drugorzędne
S_{fp}	wskaźnik znaczenia wady gdy system realizuje funkcje pomocnicze
n_e	liczba elementów systemu
α	współczynnik zależny od stosowanych rozwiązań technicznych
λ_p	współczynnik zależny charakteru pracy elementu
λ_s	współczynnik uwzględniający warunki środowiskowe
λ_t	współczynnik uwzględniający tryb pracy elementu
d_a	współczynnik związany z możliwościami wykrycia wady
d_d	współczynnik związany ze sposobem wykrycia wady
C	sumaryczny wskaźnik kosztów
c_r	współczynnik związany z kosztami wymiany/naprawy elementu
c_m	współczynnik kosztów związany z współczynnikiem λ_p
c_a	współczynnik kosztów dodatkowych
c_s	współczynnik kosztów związanych z wymiarami elementów
S_{CR}	wartość krytyczna wskaźnika znaczenia wady
O_{CR}	wartość krytyczna wskaźnika prawdopodobieństwa pojawienia się wady
D_{CR}	wartość krytyczna wskaźnika wykrycia wady
C_{CR}	wartość krytyczna wskaźnika kosztów potencjalnej wady

Terminy używane w pracy

System

Rzeczywistość złożona z elementarnych, niepodzielnych elementów wzajemnie na siebie oddziałujących, działających w pewnym środowisku zwanym otoczeniem. System może składać się z pojedynczych elementów lub może być częścią większego systemu.

Element systemu

Elementarny składnik systemu. Niepodzielny składnik, który realizuje określone funkcje.

Funkcja systemu

Podstawowe zadanie, które realizuje system i dla realizacji którego system jest zaprojektowany. W ramach tej definicji mieszczą się również wszystkie wymagania prawne i funkcjonalne dotyczące systemu.

Funkcja elementu

Podstawowe zadanie, które realizuje element systemu i dla realizacji którego jest zaprojektowany. W ramach tej definicji mieszczą się również wszystkie wymagania prawne i funkcjonalne dotyczące elementu systemu.

Wada

Zmiana cech fizyko-chemicznych lub geometrycznych, które mogą wynikać z oddziaływania czynników zewnętrznych czy też zmian w strukturze materiału degradująca funkcję pełnioną przez element.

Tryb awarii

Dysfunkcja systemu polegająca na braku realizacji zadań dla których system został stworzony. Tryb awarii czasami określany jest w literaturze jako szerzej rozumiane pojęcie niezgodności lub niedomagania.

Wskaźniki krytyczność

Ilościowa ocena ważności wady, prawdopodobieństwa wystąpienia wady, możliwości jej wykrycia

1 Wstęp

Pojęcie „jakość” ma korzenie w starożytności pojawiając się w rozważaniach filozofów greckich Platona i Arystotelesa (Bugdol, 2008), (Hamrol, 2005) Była ona definiowana jako działanie intuicyjne, polegające w uogólnieniu na dążeniu do doskonałości. W praktyce żadna z tych definicji nie zawierała jednoznacznej definicji jakości, gdyż istota tego pojęcia może być rozpatrywana na wielu płaszczyznach. Zmienia się wraz z rozwojem ludzkości i zachodzącymi przemianami. Jest obarczona subiektywnością wynikającą ze stanu wiedzy (Bugdol, 2008). W literaturze przedmiotu z pojęciem jakości utożsamiany jest postęp techniczny, niezawodność maszyn oraz nowoczesność wyrobów. Jedną z najwcześniejszych definicji jakości przedstawiona przez Shewharta (Shewhart, 1939) w latach trzydziestych XX wieku roku określana jest jako dobroć produktu, która może być zastosowana do wszystkich produktów i usług (Gudanowska, 2010). Garvin (Garvin, 1984) dokonał podziału jakości na siedem podstawowych, równorzędnych, współlistniejących kategorii: ogólne, związane z produkcją, produktem, użytkownikiem, wartością produktu, wielowymiarowe i strategiczne. Inny występujący w literaturze podział definiuje pojęcie jakości technicznej rozumiane jest jako zależność pomiędzy własnościami technicznymi, które praktycznie zrealizowano a wymaganiami, które zostały zdefiniowane (Gudanowska, 2010). Pod tym pojęciem rozpatruje się zarówno etap projektowania jak i wytwarzania. Kompletnie podejście do zdefiniowania jakości zostało przedstawione w koncepcji opracowanej przez Deminga (Deming, 2000) pod określeniem Total Quality Management (*TQM*). Termin ten wprowadza również pojęcie zarządzania jakością w rozumieniu ciągłego procesu, trwającego od etapu projektowania przez cały okres jego życia. Doskonalenie jakości jest procesem ukierunkowanym na działania z zakresu różnych dziedzin takich jak funkcjonalność, bezpieczeństwo, niezawodność czy trwałość. W dobie zrównoważonej gospodarki i przeobrażeń energetycznych pojęcie jakości nabiera nowego znaczenia i może być zdefiniowane jako „dbałość o racjonalne wykorzystanie dostępnych zasobów naturalnych”. Implikuje to zintensyfikowanie działań na rzecz doskonalenia narzędzi doskonalenia jakości oraz poszerzenia zakresu ich stosowania.

W zastosowaniach inżynierskich można pojęcie jakości utożsamiać ze zwiększeniem zdolności do bezusterkowej pracy i wydłużenia okresu, w którym produkt zachowuje swoje cechy użytkowe. W przypadku systemów o dużym stopniu złożoności wykorzystujących duże liczby elementów można zaobserwować tendencję do ujednoczenia czasu bezusterkowej pracy dla wszystkich elementarnych składników systemu.

W przeszłości doskonalenie jakości było procesem iteracyjnym, w którym zmiany wprowadzano na podstawie informacji z poprzednich wersji wyrobu lub procesu. Sformalizowanie narzędzi doskonalenia jakości, w tym w szczególności analizy FMEA (*Analiza Przyczyn i Skutków Wad*) otworzyło nowe możliwości w tej kwestii (Hamrol, 2005). Początkowo zaimplementowana do planowania misji kosmicznych (NASA, 1966) metoda została rozpowszechniona w innych zastosowaniach oraz stanowiła bazę do opracowania nowych narzędzi związanych z szeroko rozumianą jakością. Pomimo upływu czasu podstawy i założenia samej metody nie uległy zmianie, co wskazuje na jej uniwersalność będącą jednocześnie jej największą słabością, gdyż musi ona być dostosowywana każdorazowo do konkretnego problemu przez co jej efektywność zależna jest od subiektywnych czynników.

W niniejszej pracy zaproponowano modyfikację tradycyjnej metody FMEA mającą na celu zmniejszenia wrażliwości metody względem poziomu wiedzy i doświadczenia użytkowników oraz konwersji analizy jakościowej na ilościową. Opracowana i przedstawiona w pracy zmodyfikowana metoda wykorzystuje zależności przyczynowo-skutkowe pomiędzy składnikami systemów technicznych a potencjalnymi wadami. Implementacja opracowanej metody została przedstawiona na przykładzie układu hydraulicznego wykorzystywanego w turbinach wiatrowych do nastawy kąta natarcia łopat.

Praca składa się z siedmiu głównych rozdziałów. W rozdziale drugim przedstawiono tezę, zakres pracy oraz uzasadnienie podjęcia tematu pracy. W rozdziale trzecim przedstawiono podstawy tradycyjnej analizy FMEA, jej typowe wady i zalety. Przedstawiono również inne jakościowe metody wspomagające analizę FMEA. Rozdział czwarty przedstawia metody i narzędzia wykorzystane w pracy. W rozdziale piątym przedstawiono propozycję modyfikacji analizy FMEA wraz z podstawowymi założeniami, możliwościami oraz zakresem stosowalności. Rozdział szósty to implementacja opracowanej metody dla układu hydraulicznego stosowanego w turbinach wiatrowych. W rozdziale tym przedstawiono analizę FMEA całego układu oraz jej wybranego elementu: siłownika hydraulicznego. Pracę kończy rozdział siódmy, w którym przedstawiono wnioski.

2 Tezy, zakres pracy oraz uzasadnienie podjęcia tematu

2.1 Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest opracowanie modyfikacji analizy FMEA, która pozwala na zminimalizowanie problemów występujących w tradycyjnej wersji metody, związanych występowaniem czynnika ludzkiego oraz brakiem jednolitej metodyki.

Tradycyjna metoda FMEA jest jakościową metodą służącą do zwiększania niezawodności wyrobów i systemów przemysłowych. Metoda jest znana i stosowana praktycznie od kilkudziesięciu lat. Pozwala na określenie zależności pomiędzy ogólnie rozumianymi wadami wyrobów lub procesów, skutkami ich wystąpienia oraz przyczynami powstawania i w konsekwencji opracowania działań zapobiegawczych. Jednakże stopień jej uogólnienia powoduje, że jej interpretacja nie jest jednoznaczna a sposób określania krytyczności wad zależy od poziomu wiedzy i subiektywnych opinii użytkowników.

2.2 Tezy pracy

Teza 1

Wrażliwość klasycznej metody FMEA względem poziomu wiedzy i doświadczenia użytkowników może być zmniejszona poprzez usystematyzowania związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy potencjalnymi wadami i elementami systemu.

Teza 2

Podstawowe czynniki oceny ryzyka: ważność skutków potencjalnej wady (S), częstość wystąpienia wady (O), możliwość wykrycia wady (D) nie spełniają wyzwań współczesnego świata i powinny być uzupełnione o czynniki ekonomiczne: koszt wytworzenia elementu systemu oraz potencjalnej naprawy.

Teza 3

Tryby awarii mogą być określone na podstawie relacji pomiędzy uogólnionymi wadami a funkcjami, które elementy pełnią w układzie.

2.3 Zakres realizacji pracy

Ze względu na przyjęte cele pracy i tezy zakres realizacji pracy obejmuje:

1. Analizę metod jakościowych stosowanych w praktyce w celu zwiększenia niezawodności wyrobów i procesów technicznych, w tym w szczególności metodę FMEA.
2. Analizę literatury z zakresu narzędzi i metod stosowanych w celu wyeliminowania wad tradycyjnej analizy FMEA.
3. Opracowanie spójnej metodyki analizy FMEA z jednolitą definicją określania krytyczności potencjalnych wad.
4. Opracowanie metodyki określania ważności konsekwencji wystąpienia potencjalnych wad uwzględniającej:

- a) określanie wskaźnika subiektywnego prawdopodobieństwa wystąpienia wady,
 - b) określanie wskaźnika związanego z możliwością wykrycia potencjalnych wad,
 - c) określenie wskaźnika związanego z określaniem kosztów pojawienia się potencjalnych wad.
5. Implementację zaproponowanej metodologii do analizy:
- d) układu hydraulicznego,
 - e) wybranego elementu układu hydraulicznego.

2.4 Uzasadnienie podjęcia tematu pracy

Analiza FMEA jest jednym z najpopularniejszych narzędzi doskonalenia jakości. Jest jedną z pierwszych usystematyzowanych metod badających relacje pomiędzy potencjalnymi wadami i ich skutkami. Pierwsze implementacje metody sięgają lat pięćdziesiątych dwudziestego wieku w siłach zbrojnych USA (USA Military Standard, 1949). Kolejnym krokiem milowym było jej wykorzystanie podczas planowania misji kosmicznych w programie Apollo (NASA, 1966). Potencjał metody został dostrzeżony również przez potentatów przemysłu samochodowego (Smith, 2005) co skutkowało przygotowaniem podręcznika metody FMEA przez Ford Motor Company (Ford Motor Company, 2004). Skuteczność metody w przemyśle samochodowym w USA została zauważona i rozpowszechniona przez organizacje stowarzyszające producentów samochodowych na całym świecie: AIAG (*Automotive Industry Action Group*) (AIAG & VDA, 2019), VDA (*Verband der Automobilindustrie*) (VDA, 2006), SAE (*Society of Automotive Engineers*) (SAE, 1994). Uniwersalność metody FMEA umożliwiła jej wykorzystanie w przemyśle lotniczym (SAE, 2017) jak również elektrotechnicznym (IEC, 2018). Powszechność stosowania metody FMEA spowodowała, że została ona oficjalnie włączona do narzędzi doskonalenia jakości organizacji ISO (*International Standard Organization*) ISO 31000 (ISO, 2018) oraz ISO 31010 (ISO, 2018).

Pomimo ustandaryzowania metody FMEA, wciąż stanowi ona raczej ogólny opis reguł niż szczegółowy zapis konkretnych działań. Wynika to z konieczności każdorazowego dostosowania metody do unikalnych cech rozważanych procesów lub obiektów. Uniwersalność metody i jej uogólnienia są jednocześnie największą zaletą jak i ograniczeniem. Metoda FMEA zawiera bowiem elementy analizy jakościowej i ilościowej. Analiza jakościowa wykorzystuje zapisy w języku naturalnym i jest jednym ze źródeł niepewności metody. Konwersja analizy jakościowej do ilościowej jest dokonywana poprzez przypisanie wartości liczbowych do opisu kryteriów oceny wskaźników metody FMEA na podstawie których dokonywana jest ocena krytyczności potencjalnych wad. Przypisanie odpowiedniego opisu do liczbowej skali obarczone jest błędami wynikającymi z subiektywności oceny poszczególnych zapisów.

Dane do analizy FMEA przygotowywane są przez zespół ekspertów, który definiuje wszystkie wskaźniki i założenia. Analiza FMEA nie jest wieloaspektowa, a jedynie skupia się na skutkach pojedynczych wad. Efektywność analizy FMEA zależy od poprawnego jej zaplanowania. Ponadto potencjalne wady są rankingowane tylko na podstawie trzech wskaźników: ważności wady (*ang. Severity*), częstości pojawiania się wady (*ang. Occurrence*) oraz możliwości wykrycia wady (*ang. Detection*) o jednakowych wagach i skali ocen (w przypadku klasycznej analizy FMEA). Iloczyn wymienionych wskaźników zwany liczbą ryzyka (*ang. Risk Priority Number*) jest wykorzystywany do oceny krytyczności potencjalnych

wad i może dawać zniekształcony obraz rzeczywistości, w którym wada o dużym wpływie na funkcjonowanie systemu jest rankingowana niżej niż inne, mniej krytyczne wady. Prowadzi to do konieczności szczegółowego sprawdzenia wyników analizy niezależnie od uzyskanych wartości liczby ryzyka. Szczegółowy opis słabych stron klasycznej analizy FMEA został przedstawiony w rozdziale 3.4 pracy.

Wymienione cechy klasycznej analizy FMEA sprawiają, że metoda charakteryzuje się wrażliwością na poziom wiedzy i doświadczenia użytkowników zarówno w zakresie przygotowania danych do analizy jak również oceny uzyskanych wyników. Konwersja analizy jakościowej na ilościową jest obrazem subiektywnej interpretacji opisu kryteriów oceny wskaźników krytyczności. Stąd wyniki klasycznej analizy FMEA obarczone są w znacznym stopniu niepewnością, która może być ograniczona jedynie przez bardzo wysoki poziom wiedzy oraz doświadczenia użytkowników.

3 Analiza źródłowa tematu

3.1 Podstawy analizy FMEA

W klasycznej analizie FMEA, jej ogólne wymagania muszą zostać dostosowane do rozważanego przypadku. Celem każdej analizy FMEA jest ogólnie rozumiana poprawa jakości, niezawodności, usprawnienie procesów produkcyjnych, eksploatacyjnych oraz poprawa bezpieczeństwa (AIAG & VDA, 2019). Szczegółowe cele analizy FMEA są definiowane następująco:

- a) identyfikacja trybów awarii (*failure modes*), które mogą stwarzać ogólnie definiowane zagrożenia oraz niepożądane działanie systemu,
- b) udoskonalenie procesu projektowego poprzez możliwość prowadzenia analizy FMEA na początku fazy rozwoju produktu,
- c) identyfikacja i uszeregowanie trybów wad,
- d) przygotowanie danych wejściowych dla innych narzędzi jakości lub innych analiz, np.: analizy przyczyn źródłowych,
- e) zdefiniowanie działań zapobiegawczych i naprawczych.

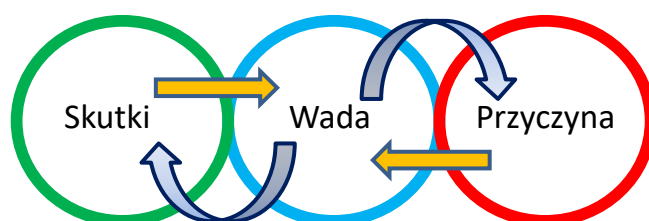
Analiza FMEA jest analizą jakościową, z definicji opierającą się na subiektywnych ocenach a nie na wielkościach mierzalnych. Dane do analizy FMEA dostarczane są przez zespół utworzony do prowadzenia analizy, który podczas swojej pracy definiuje wszystkie wskaźniki i założenia. Analiza FMEA nie jest wieloaspektowa, a jedynie skupia się na skutkach pojedynczych wad i/lub uszkodzeń. Efektywność analizy FMEA zależy od poprawnego jej zaplanowania, co może obejmować etapy przedstawione poniżej (IEC, 2018):

1. Etap przygotowawczy

- a) Określenie celu i zakresu analizy FMEA.
- b) Zdefiniowanie założeń.

Ten etap pozwala na określenie założeń i ograniczeń dla analizy FMEA w ten sposób aby wszyscy zaangażowani w proces analizy FMEA wiedzieli jaki jest cel i zakres analizy FMEA oraz w przypadku dużych systemów punkt ten powinien uwzględniać podział systemu na mniejsze podsystemy.

- c) Określenie kryteriów do oceny skutków powstania wad, oraz związek pomiędzy przyczynami wad oraz efektami jakie one wywołują.
- d) Przygotowanie dokumentacji dotyczącej obiektu analizy
- e) Zdefiniowanie środków i narzędzi do analizy FMEA



Rys. 1. Tryb awarii według: (AIAG & VDA, 2019)

2. Analiza przyczyn powstawania wad

- a) podział systemu na podsystemy oraz pojedyncze elementy

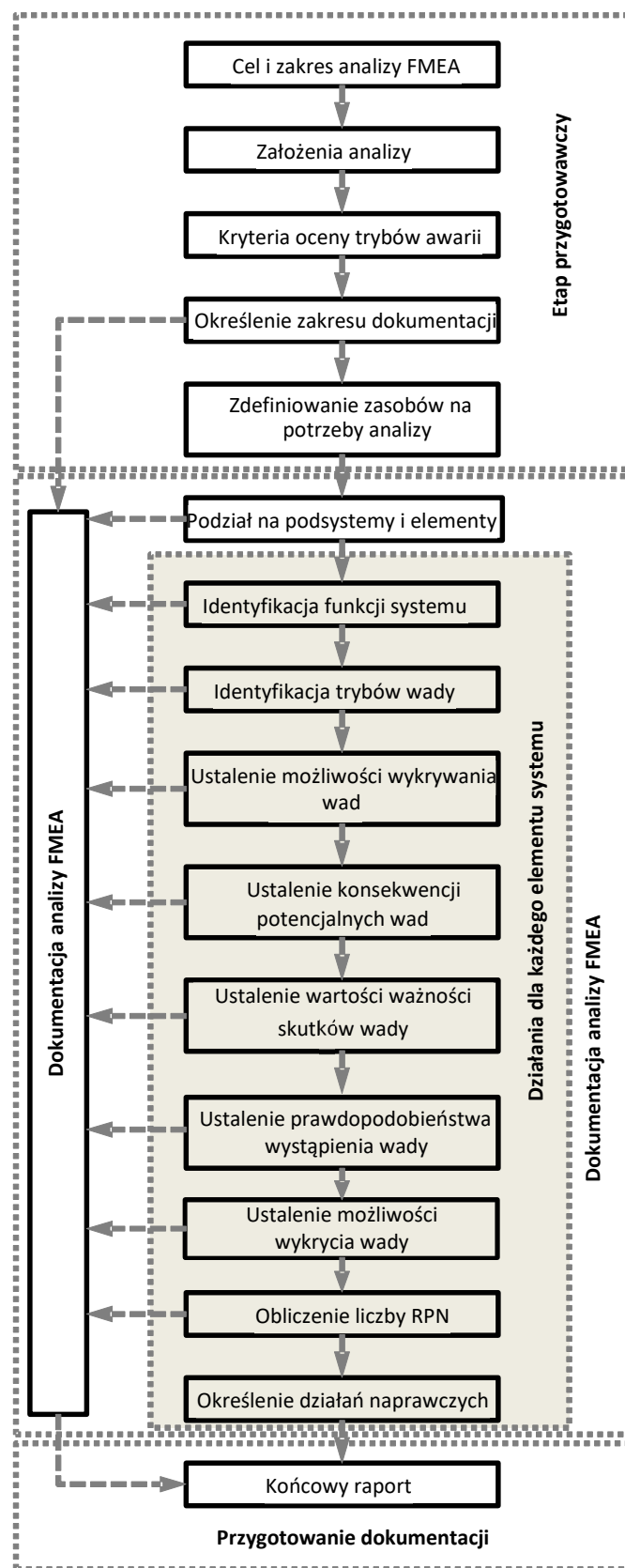
- b) identyfikacja pełnionych funkcji oraz wymagań dotyczących każdego elementu
 - c) identyfikacja trybów awarii (*ang. failure modes*)
 - d) identyfikacja metod wykrywania wad i istniejących metod kontroli
 - e) identyfikacja lokalnych oraz końcowych efektów
 - f) identyfikacja przyczyn uszkodzeń
 - g) wyznaczenie współczynników znaczenia skutków wady (S), prawdopodobieństwa wystąpienia wady (O), oraz możliwości detekcji (D)
 - h) zdefiniowanie czynności naprawczych
3. Przygotowanie dokumentacji analizy FMEA.

Schemat analizy z wyszczególnionymi czynnościami został przedstawiony na rys.2. Z racji swej natury, każdy etap analizy FMEA powinien być poprawnie opracowany z uwzględnieniem następujących zaleceń (AIAG & VDA, 2019):

- a) opis trybów wad oraz przyczyn ich powstawania powinien być przygotowany przy wykorzystaniu prostych lingwistycznych zwrotów i precyzyjnej technicznej terminologii bez zabarwienia emocjonalnego w celu uniknięcia nieporozumień i niedopowiedzeń;
- b) realność założeń i przyczyn powstawania wad: wszystkie założenia, przyczyny powstawania wad oraz rodzaje wad nie powinny być określane dla ekstremalnych przypadków (np. celowe użytkowanie systemu niezgodnie z założeniami, występowanie rzadkich zjawisk atmosferycznych, itp.);
- c) skutki potencjalnych wad są przedstawiane w czytelny i przejrzysty sposób;
- d) potencjalne wady oraz przyczyny ich powstawania są opisane jednoznacznie z uwzględnieniem wszystkich szczegółów.

Według (AIAG & VDA, 2019) analiza FMEA powinna być przeprowadzana w następujących przypadkach:

1. Projektowanie nowego wyrobu, stosowanie nowych technologii lub wykorzystanie nowych procesów.
2. Nowe zastosowanie istniejących systemów lub procesów np.: zastosowanie w innych warunkach środowiskowych lub warunków pracy.
3. Wprowadzenie zmian w istniejących wyrobach lub procesach.
Ten przypadek obejmuje zmiany projektowe, dostosowanie do nowych wymogów prawnych, zmiany obciążeń, zmiany w procesach technologicznych lub zmiany wynikające z bieżącej eksploatacji.



Rys. 2. Schemat analizy FMEA

Analiza FMEA jest prowadzona przez stworzony do tego celu zespół, który ma określone cele i zadania. Członkami zespołu są eksperci projektanci systemu, projektanci elementów systemu, testerzy, kontrolerzy jakości oraz eksperci z zakresu niezawodności i eksploatacji. W etapie właściwej analizy FMEA jedną z podstawowych czynności jest określenie trzech

wskaźników ryzyka, którymi są: ważność efektów wystąpienia potencjalnej wady S (*ang. Severity*), prawdopodobieństwo wystąpienia wady O (*ang. Occurrence*) oraz możliwość jej wykrycia D (*ang. Detection*). W przypadku analizy FMEA dla nowo projektowanych systemów, która jest określana jako DFMEA (*Design Failure Mode and Effect Analysis*) (AIAG & VDA, 2019) prawdopodobieństwo wystąpienia wady należy rozumieć raczej jako wskaźnik związany ze skłonnością do wystąpienia wady niż konkretną wartością liczbową. W przypadku analizy FMEA dla istniejących systemów, wartości prawdopodobieństwa wystąpienia wad mogą być zdefiniowane przez zespół ekspertów. Ten etap analizy FMEA składa się z dwóch etapów. W pierwszym zespół ekspertów definiuje kryteria dotyczące znaczenia skutków wad, możliwości ich wystąpienia czy też możliwości ich wykrycia i następnie przyporządkowuje do opracowanych kryteriów wartości liczbowe. Przykładowe kryteria dla analizy DFMEA zostały przedstawione w tabelach 1, 2 i 3, które zostały opracowane na podstawie (AIAG & VDA, 2019).

Tabela 1. Znaczenie potencjalnych wad (S) (źródło: (AIAG & VDA, 2019))

S	Znaczenie wady	Kryteria oceny ważności wady
10	Bardzo wysokie	Zagrożenie życia
9		Niezgodność z wymaganiami (prawnymi, normowymi)
8	Wysokie	Utrata podstawowych funkcji
7		Degradacja podstawowych funkcji
6	Średnie	Utrata drugorzędnych funkcji
5		Degradacja drugorzędnych funkcji
4		Zakłócenia pracy systemu (hałas, podwyższony poziom drgań, przegrzewanie) o wysokiej intensywności
3		Zakłócenia pracy systemu (hałas, podwyższony poziom drgań, przegrzewanie) o średniej intensywności
2	Niskie	Zakłócenia pracy systemu (hałas, podwyższony poziom drgań, przegrzewanie) o niskiej intensywności
1	Bardzo niskie	Brak objawów

Tabela 2. Szacowane prawdopodobieństwo wystąpienia wady (O) (źródło: (AIAG & VDA, 2019))

O	Szacowane prawdopodobieństwo wystąpienia wady	Kryteria oceny wystąpienia wady
10	Ekstremalne	Pierwsze zastosowania nowej technologii. Brak jakichkolwiek danych dotyczących praktycznego zastosowania. Brak norm i formalnych zaleceń. Procedury testowania i badań niedostępne.
9	Bardzo wysokie	Pierwsze wykorzystanie innowacyjnych rozwiązań technicznych. Zastosowanie systemu w nowych warunkach pracy. Brak weryfikacji stosowanych rozwiązań. Brak norm i formalnych zaleceń dotyczących analizowanych zastosowań.
8		Pierwsze wykorzystanie innowacyjnych rozwiązań technicznych. Zastosowanie systemu w nowych warunkach pracy. Brak weryfikacji stosowanych rozwiązań. Normy i formalnych zalecenia dostępne, ale nie w analizowanych zastosowaniach.
7	Wysokie	Nowe rozwiązania techniczne znane z innych zastosowań. Nowe zastosowania lub zmiana warunków pracy. Brak weryfikacji stosowanych rozwiązań. Normy i formalne zalecenia dostępne w ograniczonym zakresie.
6		Nowe rozwiązania techniczne znane z innych zastosowań. Nowe zastosowania lub zmiana warunków pracy. Brak weryfikacji stosowanych rozwiązań. Normy i formalne zalecenia dostępne, ale nie pozwalające jednoznacznie określić pojawienia się wady.
5	Średnie	Wprowadzone zmiany w istniejących rozwiązaniach, wykorzystane sprawdzone rozwiązania techniczne. Zastosowania dla podobnych warunków pracy. Dostępne pewne dane dotyczące uszkodzeń. Proces projektowy wykorzystywał doświadczenia z podobnych rozwiązań, ale nie jest zweryfikowany. Procedury testujące zdefiniowane i pozwalające wykryć wady.
4		Wykorzystane istniejące rozwiązania, ale będące stosunkowo krótko w użyciu. Zastosowania dla podobnych warunków pracy Dostępne pewne dane dotyczące uszkodzeń. Proces projektowy wykorzystywał doświadczenia z podobnych rozwiązań. Procedury testujące zdefiniowane i pozwalające wykryć wady.
3	Niskie	Zmiany wprowadzone w istniejących, sprawdzonych rozwiązaniach. Zastosowania dla warunków pracy z minimalnymi różnicami. Rozwiązania sprawdzone w porównywalnych warunkach pracy. Proces projektowania poprowadzony według sprawdzonych zasad i norm. Zdefiniowane procedury testowania.
2	Bardzo niskie	Identyczne sprawdzone rozwiązania w praktyce. Zastosowania dla podobnych warunków pracy lub cykli pracy. Rozwiązania sprawdzone w wymaganych warunkach pracy. Proces projektowania poprowadzony według sprawdzonych zasad i norm z zachowaniem odpowiednich współczynników bezpieczeństwa. Zdefiniowane procedury testowania.
1	Prawie żadne	Proces projektowania nie wpływa na występowanie wady.

Tabela 3. Możliwości wykrycia wady (źródło: (AIAG & VDA, 2019))

D	Możliwość wykrycia wady	Sposób wykrycia wady
10	Bardzo niska	Procedury diagnostyczne muszą zostać opracowane
9		Procedury diagnostyczne nie są ściśle sprecyzowane
8	Niska	Niesprawdzone metody wykrycia wad.
7		
6	Średnia	Sprawdzone metody wykrycia wad. Dostępne metody weryfikacji niezawodności. Ewentualne zmiany w projekcie mogą opóźnić uruchomienie produkcji.
5		
4	Wysoka	Sprawdzone metody wykrycia wad. Dostępne metody weryfikacji niezawodności. Proces projektowy uwzględnia ewentualne zmiany przed uruchomieniem produkcji.
3		
2		
1	Bardzo wysoka	Dostępna historia dotycząca występowania wady.

3.2 Narzędzia wspomagające analizę FMEA

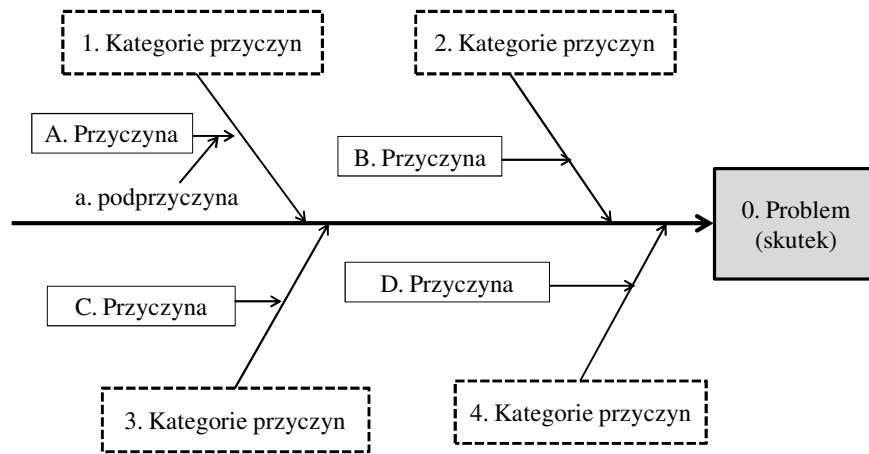
3.2.1 Diagram Ishikawy

Diagram Ishikawy po raz pierwszy został zastosowany w Japonii w firmie Sumitomo Electric. Jego autorem jest Kaoru Ishikawa, profesor Uniwersytetu Tokijskiego, który w 1962 roku opublikował podstawowe założenia diagramu (Ishikawa, 1976). Początkowo wykres ten był stosowany jedynie w przemyśle w czasie wytwarzania wyrobu, lecz w krótkim czasie okazał się on także przydatny w innych dziedzinach. Z powodzeniem można go używać w usługach, administracji, zarządzaniu projektami czy też w analizie funkcjonalności. Diagram Ishikawy ma na celu graficzną prezentację zależności zachodzących pomiędzy skutkami i mogącymi je wywołać przyczynami. Jest on analizą z kategorii TOP-DOWN, co oznacza, że analiza prowadzona jest od ogółu do szczegółu. Najpierw określa się grupę główną przyczyny a następnie identyfikuje się podprzyczyny otrzymując hierarchiczny podział przyczyn. Procedura rozwiązywania problemu (skutku) w diagramie Ishikawy obejmuje określenie problemu, wyznaczenie głównych kategorii przyczyn problemu, identyfikacja przyczyn w ramach każdej kategorii a następnie odpowiednia klasyfikacja przyczyn (wybór przyczyn, które mają największy wpływ na zaistnienie danego problemu). Budowa diagramu Ishikawy została zaprezentowana na rys.3.

Diagram Ishikawy jest przedstawiony za pomocą wykresu, w którym wyróżnić można trzy główne elementy:

- a) element 0; wskazuje na analizowany problem/skutek,
- b) element 1,2,..n; wskazuje na główne kategorie przyczyn, które wpływają na analizowany problem/skutek.

Stosuje się koncepcję 5M+E: *Man, Machine, Material, Method, Management, Environment* bądź opracowuje własne grupy przyczyn. Element A – wskazuje na przyczyny zidentyfikowane w ramach głównych kategorii (dla każdej przyczyny można określić podprzyczynę (a), która pozwoli wnikliwie zanalizować zaistniały problem/skutek). W przedmiotowej literaturze (Ishikawa, 1976) wśród głównych przyczyn rozpatrywanego problemu wyróżniono trzy podejścia, w których analizowane przyczyny mogą występować:



Rys. 3. Zasada budowy diagramu Ishikawy (źródło: opracowanie własne)

- a) podejście przedmiotowe – przyczyny są związane z elementami składowymi analizowanej sytuacji (kategorie stanowią podzespoły analizowanego obiektu, a przyczyny – elementy tych podzespołów),
- b) podejście technologiczne – rozpatruje się jako czynnościowe, bowiem polega ono na poszukiwaniu przyczyn w procesach powiązanych z problemem (procesy technologiczne i operacje w tych procesach),
- c) podejście z czynnikami uczestniczącymi – przyczyny są przedstawione w postaci grup tzw. meta-przyczyny.

Zbudowany wykres Ishikawy pozwala opracować liczbowy system klasyfikacji wad. Liczbę znaków kodu można określić w zależności od zakładanego stopnia szczegółowości zidentyfikowanych przyczyn. W związku z tym kod może składać się z dwóch lub trzech znaków. Stosując numerację podaną na rysunku 3 można opracować kod składający się z trzech znaków o numerze 1Aa gdzie:

- a) pierwszy znak 1 oznacza kategorię przyczyn (100),
- b) drugi znak A oznacza przyczynę (1A0),
- c) trzeci znak a oznacza podprzyczynę (1Aa).

3.2.2 Diagram systematyki

Diagram systematyki (*Systems Flow/Systematic Diagram*) jest jednym z nowych narzędzi doskonalenia jakości zwany także diagramem drzewa lub drzewem decyzyjnym. Najczęściej wykorzystywany jest w trakcie planowania i zarządzania procesami zachodzącymi w organizacji w celu przewidywania konsekwencji podjętych decyzji. Może być także wykorzystany w czasie opracowywania koncepcji i projektowania nowych wyrobów w celu identyfikacji możliwych do wystąpienia wad lub podczas identyfikacji działań doskonalących dla zidentyfikowanych problemów. Stanowi graficzne uporządkowanie czynności niezbędnych w ramach danego procesu lub czynników wpływających na wystąpienie danej wady. Diagram systematyzuje przyczyny problemu w porządku chronologicznym i logicznym ze względu na zdefiniowany problem zgodnie z zasadą „od ogółu do szczegółu”. Może także stanowić dalsze uporządkowanie informacji zawartych w wykresach pokrewieństwa czy też wykresach współzależności (Pacana, 2022). Główna idea diagramu systematyki nawiązuje do wykresu drzewa, dzięki któremu możliwe jest zastosowanie określonych innych technik, pomocnych w jego przygotowaniu. Jedną z tych technik jest funkcjonalny wykres systematyki bazujący na

technice FAST (Ćwiklicki i inni, 2011). Sposób postępowania podczas opracowywania diagramu systematyki obejmuje 5 etapów:

Wynikiem przeprowadzonej analizy z wykorzystaniem diagramu systematyki powinno być określenie głównej kategorii przyczyny oraz głównej przyczyny, która ma największy wpływ na zaistniały skutek/problem. Następnym krokiem powinno być opracowanie odpowiednich działań naprawczych, aby zidentyfikowany problem został rozwiązany i nie doszło do poważnych konsekwencji w związku z jego zaniedbaniem.

3.2.3 Metoda 5 *why*

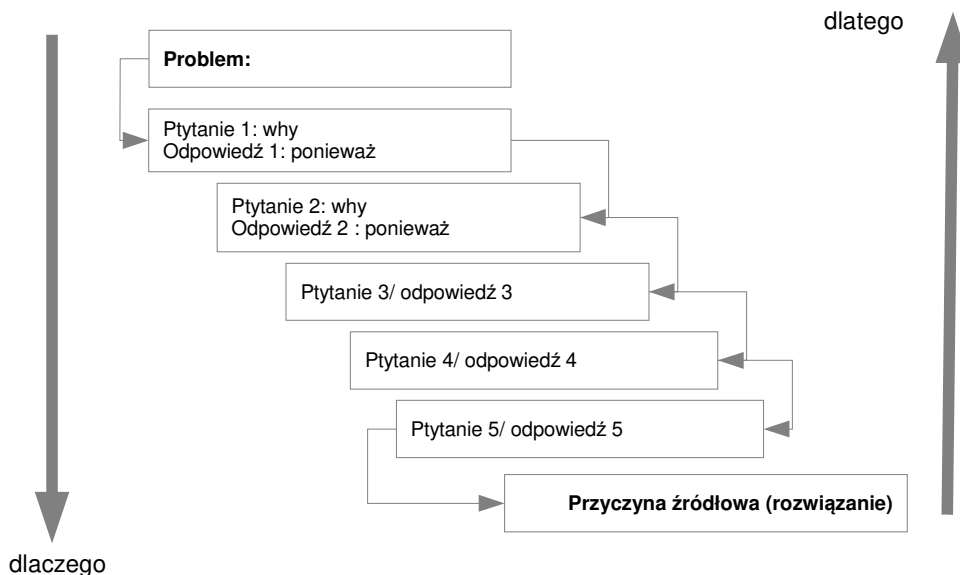
Metoda 5 *why* (Serrat, 2017) jest jedną z metod pozwalających na identyfikację przyczyn zaistniałego problemu/wady. Twórcą metody jest japoński przemysłowiec i wynalazca Sakichi Toyoda. Po raz pierwszy metoda ta została zastosowana w przemyśle motoryzacyjnym w firmie Toyota. Obecnie metoda ta jest znana na całym świecie i może być stosowana przez wszystkie organizacje bez względu na rodzaj prowadzonej działalności. Metoda 5 *why* polega na zadawaniu pytań „dlaczego” 5 razy lub jeśli jest taka potrzeba liczbę pytań można zwiększyć aż przyczyna problemu zostanie jednoznacznie określona, zrozumiana i zostaną podjęte odpowiednie działania korygujące oraz zapobiegawcze. Jednak dość często odpowiedź na piąte pytanie określa nam przyczynę problemu. Dlatego metodę tą nazywamy 5 *why*. Pozwala ona odpowiedzieć na trzy podstawowe pytania:

- a) dlaczego problem/wada wystąpił?
- b) dlaczego go nie zauważyliśmy?
- c) jak go rozwiązać? - możliwość zastosowania diagramu systematyki

Przeprowadzając analizę przyczyna-problem metodą 5 *why* należy pamiętać o kilku zasadach:

- a) prawidłowe sformułowanie problemu/wady tak aby osoby odpowiedzialne za jego analizę formułowały prawidłowe pytania;
- b) zachować logikę związków przyczynowo-skutkowych ;
- c) każda odpowiedź stanowi podstawę do zadania kolejnego pytania „dlaczego”;
- d) należy zadawać pytania, dlaczego aż do momentu wykrycia przyczyny źródłowej, której usunięcie pozwoli na całkowite wyeliminowanie problemu/wady aby podobna sytuacja nie zdarzyła się ponownie w przyszłości należy przestać zadawać pytania, kiedy odpowiedzi na kolejne pytania są takie same lub prowadzą do błędnych wniosków.

Na Rys. 4 przedstawiono koncepcję zadawania pytań w metodzie 5 *why*. Najczęściej metodę 5 *why* stosuje się w sytuacji, gdy problem/wada wystąpił jednak z powodzeniem można ją również zastosować do analiz mających na celu wykrywanie potencjalnych problemów/wad, czyli takich które dopiero mogą wystąpić. Wówczas możemy im przeciwdziałać podejmując odpowiednie działania prewencyjne lub być przygotowani na minimalizację ryzyka z nimi związanego poprzez ustalenie odpowiednich działań korygujących w odpowiednim miejscu i czasie.



Rys. 4. Przykładowy schemat zadawania pytań (źródło: opracowanie własne)

Analiza związków przyczynowo-skutkowych metodą 5 *why* przebiega w 3 etapach: przygotowanie, właściwa analiza, doskonalenie. Etap pierwszy obejmuje:

- a) wstępne określenie problemu jaki został zidentyfikowany w analizowanym wyrobie/procesie czy też usłudze;
- b) zebranie informacji tak aby stanowiły one dane wejściowe do dalszej analizy problemu np. informacje od klienta, od pracowników, procent podobnych problemów w przeszłości, itp. im większa liczba zebranych danych tym większe szanse, że przyczyny problemu zostaną prawidłowo określone.
- c) powołanie zespołu roboczego i wybranie moderatora – pracownicy, eksperci czy też klienci – wszystkie osoby, które mogą pomóc w prawidłowym ustaleniu przyczyn problemu, moderator to osoba, która będzie czuwała nad prawidłowym przebiegiem całego procesu, przypominała o problemie i pilnuje ram czasowych całej analizy.

Drugi etap analizy to tak zwana właściwa analiza, która polega na:

- a) dokładnym i ostatecznym nazwaniu i opisanie problemu po pierwszym spotkaniu zespołu roboczego. Precyzyjnie sformułowany problem pozwala skupić się na tym co jest istotne i dążyć prosto do wyznaczenia przyczyn źródłowych problemu;
- b) zadawaniu kilku pytań, które mają pomóc w rozwiązaniu problemu i znalezieniu przyczyny źródłowej;
- c) udzielanie odpowiedzi – zgodnie z zasadą 5 *why* każda odpowiedź stanowi podstawę do zadania kolejnego pytania i lepszego zrozumienia opisanego problemu.

Trzeci etap analizy to etap podejmowania działań doskonalących. Jeśli analiza dotyczyła problemu, który już istnieje to podejmowane są działania korygujące z określeniem terminu realizacji i wskazaniem osoby odpowiedzialnej za ich realizację. Jeśli jest to analiza potencjalnych problemów to wówczas formułuje się działania zapobiegawcze. Następnie monitoruje się podjęte działania. Po zakończeniu działań doskonalących sprawdza się ich skuteczność. Jeśli problem nadal występuje pomimo wdrożonych działań należy rozważyć ponowne przeprowadzenie analizy metodą 5 *why*.

3.3 Ocena ryzyka w analizie FMEA (RPN)

Ocena krytyczności przeprowadzana jest na podstawie ilościowej analizy trzech czynników: znaczenia wady S, prawdopodobieństwa jej wystąpienia O i możliwości wykrycia wady D. Standardowa ocena krytyczności przeprowadzana jest na podstawie liczby ryzyka RPN wyznaczonej jako:

$$RPN = S \cdot O \cdot D \quad (1)$$

Każdy ze wspomnianych czynników przybiera wartości 1-10, stąd wartość RPN wynosi 1-1000. Im większa wartość RPN tym większe ryzyko dla potencjalnej wady. Liczba RPN jest wielkością dyskretną a nie ciągłą i bardzo wrażliwą na niewielkie zmiany wartości jednego ze wskaźników. Poza tym iloczyn wskaźników S, O i D nie ma właściwie żadnej praktycznej interpretacji.

Alternatywną metodą oceny ryzyka jest zamiana iloczynu w sumę czynników S, O oraz D przedstawiona w normie IEC 60812 (IEC, 2018) (Braband, 2003).

$$ARPN = S + O + D \quad (2)$$

Ocena ryzyka na podstawie przedstawionych liczb kryterialnych powoduje, że pewne kombinacje czynników oceny znaczenia wady (S), prawdopodobieństwa jej wystąpienia (O) i możliwości wykrycia wady (D) dają identyczne wartości. Dodatkowo, przy jednakowym wartościowaniu wszystkich czynników ryzyka, wartość liczby RPN może zafałszować prawidłową ocenę wad, która może spowodować katastrofalne skutki. Dla wysokiej wartości znaczenia skutków wad (S=10), przy jednoczesnym małym prawdopodobieństwie wystąpienia wady (O=2) oraz bardzo dużej wartości wykrycia wady (D=1) możemy uzyskać bardzo niski wynik liczby RPN=20 w porównaniu do przypadku, w którym wykrywalność wady jest mała a prawdopodobieństwo wystąpienia wady również wysokie np. (S=2, O=9, D=9), dla którego liczba RPN wynosi 162. Dalego też zastosowano dodatkową ocenę czynników S, O, D przedstawioną jako Priorytet Działań, (ang. Action Priority) (AIAG & VDA, 2019), która klasyfikuje czynności zapobiegawcze na podstawie odpowiedniej wartości czynników S, O i D. Klasyfikacja czynności zapobiegawczych w analizie DFMEA (AIAG & VDA, 2019) jest zdefiniowana następująco:

1. Priorytet H (*High*).

Wysoki priorytet dla podjęcia lub opracowania/ulepszenia istniejących czynności zapobiegawczych lub procedur.

2. Priorytet M (*Medium*).

Średni priorytet dla podjęcia lub opracowania/ulepszenia istniejących czynności zapobiegawczych lub procedur.

3. Priorytet L (*Low*).

Niski priorytet dla podjęcia lub opracowania/ulepszenia istniejących czynności zapobiegawczych lub procedur.

Priorytet działań w zależności od wartości wskaźników S, O, D został przedstawiony w tabeli 4.

Tabela 4. Tabela priorytetów działania (źródło: (AIAG & VDA, 2019))

Ważność wady S	Prawdopodobieństwo wystąpienia wady O	Możliwość wykrycia wady D	Priorytet działań
9-10	6-10	1-10	H
	4-5	2-10	H
		1	M
		7-10	H
	2-3	5-6	M
		1-4	L
8-10		1-10	H
7-8	6-7	2-10	H
		1	M
		7-10	H
	4-5	1-6	M
		5-10	M
	2-3	1-4	L
4-6	8-10	5-10	H
		1-4	M
	6-7	2-10	M
		1	L
	4-5	7-10	M
		1-6	L
1-3	1-10	L	
2-3	8-10	5-10	M
		1-4	L
	1-7	1-10	L
1	1-10	1-10	L

Tabela 5. Macierz ryzyka (źródło: (IEC, 2018))

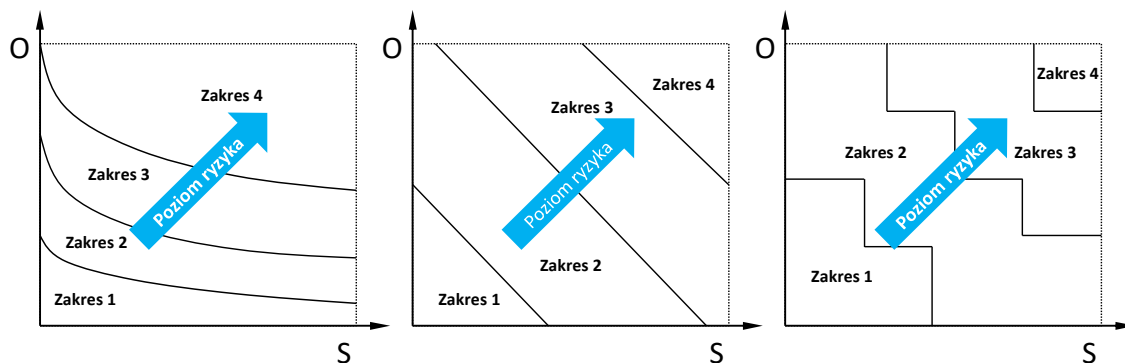
		Skutki wystąpienia wady (ważność)			
		Katastrofalne	Duże	Niewielkie	Pomijalne
Prawdopodobieństw o wystąpienia wady	Wysokie	X	X	1	2
	Średnie	X	X	1	2
	Niskie	X	X	1	2
	Bardzo niskie	X	1	1	2
	Pomijalne	1	2	2	3

Norma IEC 60812 (IEC, 2018) pozwala na określanie krytyczności w formie wykresów lub macierzy krytyczności (macierz ryzyka) w postaci przedstawionej w tabeli 5. Macierz ta nie uwzględnia możliwości wykrycia wady a jedynie ważność skutków wady oraz prawdopodobieństwo wystąpienia wady. Wartości tabeli określają poziomy krytyczności w następujący sposób:

- X: Nieakceptowalny;
- 1: Niepożądany;
- 2: Akceptowalny;
- 3: Pomijalny.

Przedstawiona macierz tylko jednak tylko sugestia a nie nawet zalecenie. Zapisy normy jasno definiują, że każdy przypadek powinien być traktowany oddzielnie i macierz powinna być tworzona według indywidualnych potrzeb dla każdego rozważanego problemu.

Wykresy poziomu ryzyka w zależności od wartości ważności oraz prawdopodobieństwa wystąpienia wady przedstawiono na rysunku Rys. 5, gdzie różne poziomy ryzyka są tworzone albo przez odcinki, krzywe lub zestawy odcinków poziomych i pionowych.



Rys. 5. Poziomy ryzyka określany na podstawie wykresów (źródło: (IEC, 2018))

W praktyce stosuje się również inne metody związane z szacowaniem ryzyka, które zawarte są w normie ISO 31000 (ISO, 2018) oraz ISO 31010 (ISO, 2018). Wśród stosowanych metod wspomniane normy opisują wykorzystanie metod jakościowych, jakościowo-ilościowych czy też ilościowych, takich jak:

- a) HAZOP (*Hazard and Operability Study*). Jest to rodzaj jakościowej systematycznej analizy ryzyka opartej na ustalaniu odchyłek systemu od stanu normalnego na podstawie kluczowych lingwistycznych zwrotów. Jest to metoda znormalizowana i przedstawiona w normie (IEC, 2016). Metoda może być wykorzystywana na etapie projektowania systemów. Jest przeprowadzana na podstawie systematycznego przeglądu i analizy wszystkich elementów systemu oraz ich wpływu na działanie systemu w sensie konsekwencji jakie potencjalne odstępstwa mogą w systemie wywołać. Słowa kluczowe mogą być dostosowane do konkretnego przypadku spośród sugerowanych zwrotów. Wadą tej metody jest konieczność wykorzystywania zespołu złożonego z szerokiej gamy ekspertów w danej dziedzinie oraz czasochłonność procesu wymagająca analizowania poszczególnych stanów systemu.
- b) SWIFT (*Structured What If Technique*). Jest to rozwinięcie metody HAZOP w uproszczonej wersji. W związku z tym metoda ta dziedziczy podstawowe cechy z metodą HAZOP, jest jednak metodą wydajniejszą, gdyż dane do analizy dostarczane są na podstawie dostępnej historii eksploatacji danego systemu.
- c) RCA (*Root Cause Analysis*): metoda analizy przyczyn źródłowych. Wykorzystuje usystematyzowane metody poszukiwaniu źródeł występujących problemów (Andersen i inni, 2006).

3.4 Podstawowe problemy analizy FMEA

Pomimo szerokiego spektrum zastosowania oraz stosunkowo długiej historii praktycznego wykorzystania analiza FMEA ma szereg niedociągnięć, które są przedmiotem wielu prac

naukowych. Syntetyczne zastawienie typowych wad tradycyjnej analizy FMEA przedstawiono w pracach (Liu i inni, 2013), (Huang i inni, 2020), (Liu i inni, 2019), (Liu, 2016). Do najpoważniejszych należą:

1. Ocena krytyczności potencjalnych wad określana na podstawie trzech wskaźników ryzyka: S (znaczenia skutków wady), O (prawdopodobieństwa wystąpienia wady) oraz D (możliwości wykrycia wady).
2. Wykorzystanie języka naturalnego na etapie konwersji oceny jakościowej do ilościowej.
3. Jednakowe wagi dla wskaźników ryzyka.
4. Wykorzystanie tylko trzech wskaźników ryzyka.
5. Wrażliwość metody na poziom wiedzy i doświadczenie użytkowników

3.4.1 Liczba ryzyka RPN

Ocena ryzyka przeprowadzana jest na podstawie iloczynu trzech wskaźników S (znaczenie wady), O (prawdopodobieństwo wystąpienia wady) oraz D (możliwość wykrycia wady) określana przez liczbę RPN (*Risk Priority Number*), która pozwala uzyskać takie same wyniki dla różnych kombinacji wskaźników. W celu wyeliminowania tego problemu stosowane są różne podejścia, które sprowadzają się np. do modyfikacji liczby RPN tak jak zostało to przedstawione w pracy (Chang i inni, 2009) przez zastosowanie dodatkowego narzędzia jakim jest DEA (*Data Envelopment Analysis*). W pracy (Chin i inni, 2009) przedstawiono wykorzystanie dodatkowych narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji do oceny krytyczności bazując na trzech bazowych wskaźnikach. Przedstawiona w normie EN IEC 60812 (IEC, 2018) alternatywna metoda oceny ryzyka przedstawiona w pracy (Braband, 2003) zastępuje iloczyn sumą trzech wskaźników ryzyka. Często spotykaną modyfikacją tradycyjnych wskaźników jest uzupełnianie ich o dodatkowe współczynniki, tak jak zaproponowali to autorzy w pracy (Savino i inni, 2018), gdzie wskaźnik znaczenia wady S został uzupełniony o dodatkowe współczynniki korekcyjne a sama metoda oceny krytyczności została oparta o ważony wskaźnik liczby RPN. W pracy (Jamshidi i inni, 2015) autorzy zaproponowali wykorzystanie tradycyjnych wskaźników S, O, D wraz z ośmioma dodatkowymi współczynnikami wykorzystanymi do oceny znaczenia potencjalnych wad sprzętu medycznego. Natomiast autorzy pracy (Anes i inni, 2018) zaimplementowali sposób oceny ryzyka przy wykorzystaniu funkcji liniowej, której interpretacją fizyczną są izopowierzchnie dla kombinacji wskaźników S, O, D. W konsekwencji została zaproponowana nowa ocena ryzyka wykorzystująca znane wskaźniki i nową funkcją priorytetu ryzyka. Badania prowadzone są nie tylko nad modyfikacjami tradycyjnych wskaźników, ale również w zakresie zmian sposobu ich określania. Praca (Koomsap i inni, 2018) zmienia znany sposób definiowania wartości wskaźników S, O, D na taki, w którym uwzględnia się wymagania klientów.

3.4.2 Konwersja oceny jakościowej na ilościową

Jednym z etapów tradycyjnej metody FMEA jest zamiana oceny jakościowej w ilościową. Kryteria oceny trzech podstawowych wskaźników krytyczności: S, O i D są tworzone z wykorzystaniem języka naturalnego, do których następnie przypisywane są odpowiednie wartości liczbowe. Taki proces wprowadza duże niepewności wynikające z różnego postrzegania i zrozumienia zdefiniowanego kryterium, które z definicji nie jest jednoznaczne

określone. W celu rozwiązania tego problemu stosuje się zmienne lingwistyczne (*linguistic variable*) (Zadeh, 1975), które zastosowano w pracy (Liu i inni, 2015) do klasyfikacji wskaźników O, S, D oraz oceny krytyczności potencjalnych wad.

3.4.3 Czynniki wpływające na ocenę czynników S, O, D

Tradycyjne wskaźniki S, O, D nie pozwalają ująć złożoności niektórych systemów i konieczne jest uzupełnianie ich dodatkowymi wskaźnikami. Ta cecha została zauważona w końcu lat dziewięćdziesiątych i uzupełniona o dodatkowy wskaźnik związany z czynnikiem ekonomicznym, którym był przewidywany koszt powstałej wady (Braglia, 2000). Prace lat późniejszych również wyrażają zainteresowanie kosztami jako jednym z decydujących czynników krytyczności w analizie FMEA (Lo i inni, 2018), (Jahangoshai Rezaee i inni, 2017). Kolejnym przykładem, który wykazuje konieczność uwzględniania dodatkowych informacji przy ocenie krytyczności w analizie FMEA jest praca (Chen, 2017) w której wykorzystano efektywność działań naprawczych. Innym podejściem przedstawionym w pracy (Di Bona i inni, 2018) jest wykorzystanie skuteczności działań zapobiegawczych i ich kosztów.

Zupełnie inne podejście zaprezentowano w pracy (Carpitella i inni, 2018) gdzie zrezygnowano z dwóch tradycyjnych czynników na rzecz czasu związanego z czynnościami serwisowymi oraz sposobem ich wykonania. Kolejny przykład wykorzystania dodatkowych czynników jest przedstawiony w pracy (Selim i inni, 2016) gdzie autorzy wykorzystali dodatkowe wskaźniki związane z możliwościami technicznymi, mocami produkcyjnymi i przewidywanym zyskiem w analizie procesu produkcyjnego produktów żywnościowych. Należy nadmienić, że dodawanie kolejnych czynników poza ogólnie rozumianymi kosztami niekoniecznie musi być uzasadnione w innych zastosowaniach niż przedstawiono w powyższym opisie.

Wskaźniki tradycyjnej analizy FMEA są jednakowo wartościowane i niezależne. Stąd w literaturze dotyczącej analizy FMEA można zaobserwować stosowanie odpowiednich wag dla czynników ryzyka S,O,D. Wagi wskaźników mogą być arbitralnie definiowane, w zależności od potrzeb lub/i na podstawie doświadczeń lub/i wiedzy ekspertów. Zastąpienie iloczynu trzech wskaźników ryzyka funkcją, której wykładnikami potęg są wskaźniki ryzyka S, O, D wraz z odpowiednimi wagami zaproponowano w pracy (Chang i inni, 2014). Opracowana w ten sposób metoda oceny ryzyka została nazwana jako wykładnicza funkcja oceny ryzyka (*ERP**N*- *exponential risk priority number*). Inne podejście zaproponowano w pracy (Du i inni, 2014) w której wagi ekspertów dla poszczególnych wskaźników są uśredniane w celu wyeliminowania niepewności poszczególnych ocen. Podobne podejście zaproponowano w pracy (Tang i inni, 2018), w której również brano pod uwagę aspekt niepewności oceny wydawanej przez ekspertów. Zastosowano wagi dla wskaźników, które zostały utworzone na bazie relacji pomiędzy skrajnymi ocenami ekspertów.

3.5 Metody eliminacji podstawowych wad analizy FMEA

Wymienione w poprzednim rozdziale problemy klasycznej analizy FMEA sprowadzają się do jednego podstawowego zadania jakim jest ocena krytyczności potencjalnych wad. Niezależnie od przyjętej metody, do oceny krytyczności wykorzystuje się podstawowe wskaźniki S, O, D lub ich modyfikacje sprowadzając ocenę krytyczności do metod wielokryterialnego

podejmowania decyzji (*MCDM: Multi Criteria Decision Making*). W literaturze dotyczącej FMEA można określić kilka podstawowych stosowanych metod (Liu, 2016):

1. Metody oparte na miarach odległości.
2. Metody rankingowe (*TOPSIS, VIKOR*)
3. Metody porównywania rozwiązań (*AHP*).
4. Inne metody, w tym metody hybrydowe łączące wyżej wymieniony metody.

Niezależnie od stosowanych metod wielokryterialnych na szeroką skalę wykorzystywane są metody logiki rozmytej (*fuzzy logic*) do oceny poszczególnych wskaźników lub wspomagające metody wielokryterialne.

Przykładowe wykorzystanie miar odległości jest przedstawione w pracach (Liu i inni, 2014), (Liu i inni, 2014), gdzie wykorzystano miary normy Euklidesowskiej do oceny krytyczności. Dodatkowo wykorzystano dodatkowe wagi dla zastosowanych kryteriów oceny krytyczności, które uwzględniały niepewności wynikające z subiektywnych ocen eksperckich. Jedno z pierwszych zastosowań metod rankingowych zostały przedstawione w pracy (Braglia i inni, 2003), gdzie autorzy wykorzystali metodę *TOPSIS (Technical for Order Preference using Similarity to Ideal Solution)* do oceny krytyczności wad używając miary odległości od rozwiązania idealnego i antyidealnego.

Autorzy pracy (Safari i inni, 2016) wykorzystali metodę *VIKOR (Višekriterijumsko Kompromisno Rangiranje)* do oceny składników przedsiębiorstw i zależności występującej pomiędzy nimi.

Pierwsze wykorzystanie metody *AHP (Analytical Hierarchy Process)* w analizie FMEA zostało przedstawione w pracy (Braglia, 2000) do opracowania wielokryterialnej metody analizy przyczyn i skutków wad. Inne wykorzystanie metody *AHP* zostało przedstawione w (Carmignani, 2009), gdzie zaproponowano modyfikację metody FMEA zorientowane na koszty, gdzie *AHP* zostało zaimplementowane do zróżnicowania wskaźników ryzyka. Połączenie metody *TOPSIS* i *AHP* znalazło zastosowanie do ustalenie wag dla poszczególnych wskaźników ryzyka oraz opracowaniu rankingu krytyczności zostało przedstawione w pracy (Kutlu i inni, 2012).

Niezależnie od stosowanych metod wielokryterialnych w celu wyeliminowania problemów związanych z transformacją oceny jakościowej na ilościową bardzo często są one łączone z logiką rozmytą. Zastosowania znajdują również implementacje klasycznej analizy FMEA z elementami logiki rozmytej, która jest wykorzystywana do przygotowania wskaźników ryzyka S, O, D oraz oceny ryzyka wykorzystując liczbę RPN. Takie rozwiązania zostały przedstawione w pracach: (Liu i inni, 2011), (Filo i inni, 2018).

Przedstawione powyżej przykłady nie wyczerpują problematyki narzędzi stosowanych w celu wyeliminowania podstawowych problemów analizy FMEA. Kompletna i szczegółowa analiza metod wielokryterialnych jest przedstawiona w pracy (Liu, 2016). Niezależnie jednak od ilości stosowanych metod, przeważająca większość wykorzystanych narzędzi wykorzystuje dodatkowo logikę rozmytą.

4 Metodyka i technika pracy własnej

W pracy wykorzystano badania ankietowe, których celem jest zweryfikowanie postawionych tez o słabościach klasycznej analizy FMEA. Opracowano metodę klasyfikacji potencjalnych wad i elementów oraz określono relacje przyczynowo-skutkowe pomiędzy nimi. Opracowano metody szacowania wskaźników krytyczności, w tym subiektywnego przewidywanego prawdopodobieństwa. Opracowano również trój etapową metodę określania krytyczności potencjalnych wad.

Aby zachować spójność opisu pomiędzy wskaźnikami klasycznej analizy FMEA przedstawionymi w rozdziale 3.1 wszystkie wskaźniki i współczynniki korygujące zostały przedstawione w kolejności od największej wartości do najmniejszej.

4.1 Badania ankietowe

W celu zweryfikowania tezy o wrażliwości metody FMEA na subiektywne oceny użytkowników przygotowano ankietę, która została przesłana drogą elektroniczną do wytypowanych ekspertów z zakresu napędów i układów hydraulicznych. Ze względu na wymogi formalne analizy FMEA nie można było przygotować ankiety zgodnie z zasadami konstruowania ankiet (Lutyńska, 1984) (Zagańczyk, 2014). Przygotowano więc ankietę obejmującą kilka czynności z etapu przygotowawczego oraz właściwej analizy FMEA przedstawionej na rysunku 2. Przy tworzeniu ankiety zdawano sobie sprawę z faktu, że w przeciwieństwie do badań socjologicznych nie można było formułować prostych pytań zdając sobie jednocześnie sprawę, że odpowiedzi będą wymagały od respondenta pewnego wysiłku intelektualnego i poświęcenia czasu na przygotowanie odpowiedzi.

Przygotowany kwestionariusz zawierał:

1. Informację o celu badań wraz z krótkim opisem metody FMEA oraz obiektu badań.

Przygotowano krótki opis celu ankiety oraz obiektu, którego dotyczy. Jako obiekt badań wybrano typowy element układów hydraulicznych, którym jest siłownik dwustronnego działania.

2. Zapewnienie o poufności.
3. Instrukcja przygotowywania odpowiedzi.

W ankiecie przygotowano arkusz podobny do arkuszy stosowanych w analizie FMEA

4. Pytania w części właściwej ankiety.

Przygotowano schematyczny rysunek, opis w jakim układzie siłownik będzie stosowany oraz jakie są szczegółowe wymagania dotyczące siłownika (występowanie przecieków zewnętrznych jest niedopuszczalne w związku z ryzykiem wystąpienia pożaru).

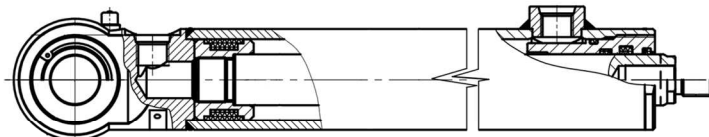
Zawartość kwestionariusza przedstawiono w tabelach 6,7 i 8.

Tabela 6. Kwestionariusz ankiety, pytania 1-3 (źródło: opracowanie własne)

Cel badania: określenie wskaźnika znaczenia wady dla analizy FMEA

Oświadczenie o poufności: Informacje dotyczące miejsca pracy, stanowiska, dane osobowe nie zostaną ujawnione w jakiegokolwiek formie i treści

Obiekt badań: siłownik hydrauliczny dwustronnego działania, który służy do nastawy kąta natarcia łopaty turbiny wiatrowej
wymagania szczegółowe: zagrożenie pożarowe, brak przecieków zewnętrznych



Pytanie 1. Proszę podać dwie najczęściej występujące wady dla wymienionych elementów siłownika

lp.	Element siłownika	Wada
1.	Łoczysko	
	Łoczysko	
2.	Uszczelnienie dławnicy	
	Uszczelnienie dławnicy	

Pytanie 2. Proszę zdefiniować kryteria oceny ważności wad siłownika S i przypisać do nich wartości liczbowe od 1 do 10

Ważność wady	Ogólne kryteria oceny	Wartość S
Krytyczna		
Bardzo Duża		
Duża		
Umiarkowana		
Miała		
Bardzo mała		
Niewielka		
Żadna		

Pytanie 3. Czy miał Pan/Pani problemy z zdefiniowaniem kryteriów oceny?

NIE	
TAK proszę opisać problemy	

Tabela 7. Kwestionariusz ankiety, pytania 4 i 5 (źródło: opracowanie własne)

Pytanie 4. Czy tabela przedstawiona poniżej może być pomocna w ocenie ważność wad zamieszczonych w pytaniu nr 1?

Ważność wady	Ogólne kryteria oceny	Wartość S
Krytyczne	Wystąpienie wady uniemożliwia wykonywanie podstawowej funkcji siłownika	10
	Wystąpienie wady narusza kluczowe wymagania (nadmierne przecieki zewnętrzne)	9
Bardzo Duże	Wystąpienie wady uniemożliwia wykonywanie podstawowej funkcji siłownika z dużymi ograniczeniami	8
	Wystąpienie wady narusza kluczowe wymagania (początki przecieków zewnętrznych)	7
Duże	Wystąpienie wady uniemożliwia wykonywanie podstawowej funkcji siłownika w dużym zakresie	6
Umiarkowane	Wystąpienie wady uniemożliwia wykonywanie podstawowej funkcji siłownika w średnim zakresie	5
Małe	Wystąpienie wady uniemożliwia wykonywanie podstawowej funkcji siłownika w niewielkim zakresie	4
Bardzo małe	Wystąpienie wady uniemożliwia wykonywanie pomocniczych funkcji siłownika w dużym zakresie	3
Niewielkie	Wystąpienie wady uniemożliwia wykonywanie pomocniczych funkcji siłownika w niewielkim zakresie	2
Żadne	Układ działa prawidłowo, nie ma żadnych zakłóceń w pracy siłownika	1

TAK	
NIE (proszę opisać powody)	

Pytanie 5. Proszę ocenić ważność wad z pytania nr 1 wykorzystując kryteria z pytania nr 4?

Ip.	Element siłownika	Wada	Ważność wady: S
1.	Tłoczysko		
	Tłoczysko		
2.	Uszczelnienie dławnicy		
	Uszczelnienie dławnicy		

Tabela 8. Kwestionariusz ankiety, pytania 6-9 (źródło: opracowanie własne)

Pytanie 6. Ile lat zajmuje się Pan/Pani układami hydraulicznymi?

poniżej 1	
1-5	
6-10	
>11	

Pytanie 7. Proszę podać jaki charakter ma Pana/Pani praca

projektowanie elementów hydraulicznych	
projektowanie układów hydraulicznych	
eksploatacja układów hydraulicznych	
naprawa układów/elementów hydraulicznych	

Pytanie 8. Czy miał Pan/Pani wcześniej do czynienia z analizą FMEA?

TAK	
NIE	

Pytanie 9. Czy ma Pan/Pani jakieś sugestie dotyczące sposobu definiowania wskaźnika ważności wady?

4.2 Wyniki badań ankietowych

Zdawano sobie sprawę, że badania ankietowe nie muszą w pełni odzwierciedlać pracy zespołu utworzonego na potrzeby analizy FMEA, gdyż stopień zaangażowania respondentów jest nieweryfikowalny. Badania ankietowe częściowo zostały przeprowadzone bez udziału ankietera, zostały wysłane drogą elektroniczną w postaci emaila do wybranych osób zajmujących się układami hydraulicznymi. Responsywność ankiety wynosiła około 10% co z pewnością wynikało ze specyfiki ankiety, która wymagała udzielania odpowiedzi na specjalistyczne pytania.

Wyniki badań ankietowych przedstawiają się następująco:

Pytanie nr 1.

Wszyscy respondenci odpowiedzieli zgodnie, że najczęściej występującymi wadami dla tłoczyska to korozja i zużycie. Przy czym obie wady były wymieniane naprzemiennie jako najczęściej występująca wada lub druga w kolejności.

W przypadku uszczelnień dławnicy większość odpowiedzi wskazywała na zużycie jako najczęściej występującą wadę. Pojawiły się jednak odpowiedzi, które wskazywały skutek (przecieki) jak występującą wadę.

Pytanie nr 2.

Nikt z ankietowanych nie zdefiniował wszystkich kryteriów oceny dla wskaźnika ważności. Nie było problemów ze zdefiniowaniem kryteriów dla najwyższej i najniższej wartościowanego wskaźnika. Było to odpowiednio: brak ruchu tłoczyska i prawidłowa praca siłownika.

Pytanie nr 3.

Wszyscy ankietowani potwierdzili problemy z określeniem kryteriów oceny. Jako powody wykazywali zbyt duży zakres skali oceny (10 stopni) oraz trudności z interpretacją oceny lingwistycznej: bardzo duży, duży, umiarkowany, średni.

Nikt z ankietowanych nie zdefiniował kryteriów oceny dla wskaźnika ważności.

Pytanie nr 4.

Wszyscy zgodnie przyznali, że przedstawiona tabela z kryteriami oceny jest przydatna, jednakże pozostaje problem z interpretacją terminów: średni i umiarkowany

Pytanie nr 5.

Odpowiedzi na przedstawione pytanie zostały przedstawione w tabeli Tabela 9.

Tabela 9. Kryteria oceny znaczenia skutków wady (źródło: opracowanie własne)

lp.	Element siłownika	Wada	Skutki wady: S
1.	Tłoczysko	korozja	8 – 20%, 7 – 60%, 4 – 15%, 6 – 5%
	Tłoczysko	zużycie	8 – 20%, 7 – 60%, 4 – 15%, 6 – 5%
2.	Uszczelnienia dławnicy	zużycie	9 – 55%, 8 – 41%,

Pytanie nr 6.

Odpowiedzi wskazywały jedną osobę o doświadczeniu poniżej jednego roku. Pozostali wskazywali doświadczenie od 6 do 10 lat.

Pytanie nr 7.

Jedna piąta ankietowanych zajmuje się projektowanie układów hydraulicznych. Pozostali eksploatacją układów hydraulicznych.

Pytanie nr 8.

Nikt z ankietowanych nie miał doświadczenia z analizą FMEA.

Pytanie nr 9.

Nikt z ankietowanych nie podał żadnych uwag lub sugestii.

4.3 Zmodyfikowana analiza FMEA

Założenia klasycznej metody FMEA są na tyle uniwersalne, że spektrum jej stosowania jest bardzo szerokie, począwszy od procesu projektowania systemów, poprzez proces ich implementacji aż do ich użytkowania. Przeprowadzona analiza literatury przedstawiona w rozdziale 3.4 wykazuje, że słuszne, co do zasady, uogólnienia metody FMEA są źródłem największych niedogodności. W realnym świecie systemy, które wykorzystują tylko i wyłącznie elementy tego samego rodzaju (czysto elektryczne, mechaniczne, itp) są rzadkością spotykaną w stosunkowo prostych zastosowaniach. Złożone systemy charakteryzują się nie tylko ilością wykorzystywanych elementów, ale również różną specyfiką, dlatego też każdy rodzaj systemu powinno się rozpatrywać osobno.

W klasycznej metodzie FMEA jednym z początkowych etapów jest określenie niezgodności rozważanego obiektu (procesu) z założeniami.

4.3.1 Podstawowe założenia

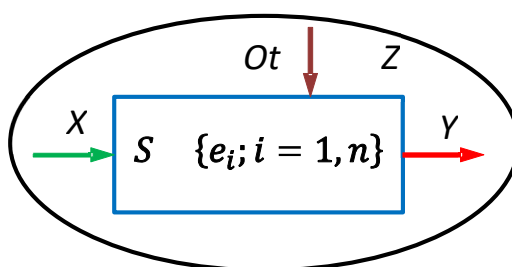
W związku z tym, że każdy rodzaj systemu jest na tyle specyficzny istnieje potrzeba opracowania metod dedykowanych dla konkretnych systemów. W opracowanej modyfikacji analizy FMEA przyjęto następujące założenia:

1. Tryby awarii systemu są określane dla systemów tego samego rodzaju (mechaniczne lub hydrauliczne).
2. Tryby awarii (*ang. failure mode*) określane są na podstawie związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy uogólnionymi wadami i funkcjami jakie elementy pełnią w systemie.
3. Dane dotyczące awarii i uszkodzeń nie są dostępne.
4. Występowanie potencjalnej wady jest traktowane jako losowo niezależne zdarzenie a nie jako sekwencja powiązanych ze sobą zjawisk.
5. Analiza krytyczności potencjalnych wad jest określana na podstawie podstawowych wskaźników ryzyka rozszerzonych o wskaźniki związane z kosztami wytworzenia i wymiany (naprawy).
6. Analiza krytyczności wad jest wieloetapowa. Jest oceniana na podstawie niezdolności systemu do realizowania funkcji systemu oraz kryterialnych wartości wskaźników ryzyka określanych przez użytkownika.
7. Zakres modyfikacji dotyczy metod określania wskaźników krytyczności i ustalania rankingu wad.

4.3.2 Opis zmodyfikowanej analizy FMEA

Jednym z zadań etapu przygotowawczego klasycznej analizy FMEA przedstawionej w rozdziale 3.1 jest określenie trybów wad, czyli określenie niezgodności, które mogą wystąpić w odniesieniu do realizowanych funkcji przedmiotu. Następnie poszukiwane są przyczyny (wady) potencjalnych trybów wad. W przedstawionej metodzie zaproponowano odwrócenie kolejności działań. Zaproponowano klasyfikację potencjalnych wad względem skutków, które

mogą wywołać w elementach. Podobnie dokonano klasyfikacji elementów na podstawie pełnionej roli (funkcji) w rozważanym obiekcie. Relacje przyczynowo-skutkowe pomiędzy wadami a elementami określają potencjalne tryby wad. Szczegółowy opis zaproponowanej metody przedstawiono wykorzystując teorię systemów. W ogólnym opisie zaproponowanym przez Ludwiga von Bertalanffy (Bertalanffy, 1968) rzeczywistość może być zdefiniowana jako system, który w zależności od potrzeb i dziedziny zastosowania może być różnie definiowany. W cybernetycznej koncepcji systemu (S), może on być zdefiniowany jako całość złożona z elementów (E) wzajemnie na siebie oddziałujących a wszystko co znajduje się poza systemem jest nazywane otoczeniem (Ot). Przy czym możemy mówić o systemie składającym się z elementów jako osobnym systemie lub jako część większego systemu. Każdy system posiada wejścia (X), które mogą być rozumiane jako oddziaływanie na system oraz wyjścia (Y), które mogą być rozumiane jako odpowiedź systemu (realizowane funkcje) przy działających zakłóceniach (Z).



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie systemu (źródło: opracowanie własne)

Stosując notację rachunku operatorowego system może być określony jako:

$$S: X \xrightarrow{Z} Y \quad (3)$$

Możemy założyć, że każdy system (S) jest stworzony do realizacji określonych funkcji (F). Strukturę systemu można zapisać w notacji matematycznej jako:

$$S = \langle E, E \times E \rangle \rightarrow F \quad (4)$$

gdzie:

$R = E \times E$ – zbiór relacji pomiędzy elementami systemu

$E = \{e_i; i = 1, n\}$ – zbiór elementów systemu

$F = \{f_i; i = 1, n\}$ – zbiór realizowanych funkcji systemu

Zbiór realizowanych przez system (S) funkcji (F) możemy opisać jako parametry jakościowe f_i , gdzie index i oznacza parametr opisujący w sposób jakościowy funkcje dla których realizacji system został zaprojektowany lub zbudowany. W ogólnym rozumieniu funkcje te mogą być opisem różnic pomiędzy funkcjami dla których system został zbudowany a realizowanymi w rzeczywistości. Ograniczenia w realizowanych funkcjach systemu są wynikiem wpływu zakłóceń, które mogą być rozumiane jako wady poszczególnych elementów systemu.

Zakładając, że pomiędzy elementami systemu (e_i) i zakłóceniami, które w opisywanym przypadku są wadami (z_i), zachodzi pewna reakcja R otrzymujemy:

$$\forall e_i \in E \quad \forall z_i \in Z \quad R z_i \Rightarrow F \quad (5)$$

W zależności od rodzaju zakłócenia (wady) $z_i \in Z$ i rodzaju elementu systemu $e_i \in E$ system może realizować zamierzone funkcje w sposób zamierzony lub ograniczony, a poziom ich ograniczeń może być opisany parametrami jakościowymi. W ogólności funkcja realizowana przez system zależy od rodzaju zakłócenia z_i (wady) i elementu systemu e_i na jaki ona oddziałuje.

W dalszej części pracy dokonano podziału potencjalnych wad i elementów na odpowiednie klasy. W celu zachowania spójności opisu z rozdziałem 3.1 pracy, podział wad, elementów oraz innych współczynników i wskaźników został przedstawiony w kolejności malejącej.

4.3.3 Ocena znaczenia skutku wady

Każdy element systemu realizuje funkcje, które mogą być różnie klasyfikowane w zależności od realizowanych funkcji większego systemu. Znaczenie potencjalnych wad określono jako rozwinięcie oceny znaczenia wad zaproponowanych w normie MIL STD 882 (USA Military Standard, 2000), ale uzupełnioną o dodatkowe współczynniki korekcyjne. Każdy system realizujący dowolne zadania składa się z podstawowych elementów, które mogą być ze sobą połączone szeregowo, równoległe lub szeregowo-równoległe.

Elementy systemu $e_i \in E$ można podzielić ze względu na funkcję jaką pełni w systemie na:

- Elementy, których uszkodzenie lub niewłaściwe działanie uniemożliwia realizowanie zamierzonych funkcji systemu. (klasa E4)
- Elementy, których uszkodzenie lub niewłaściwe działanie zapewnia realizację zamierzonych funkcji systemu z poważnymi ograniczeniami. (E3)
- Elementy, których uszkodzenie lub niewłaściwe działanie zapewnia realizację zamierzonych funkcji systemu z niewielkimi ograniczeniami. (E2)
- Elementy, których uszkodzenie lub niewłaściwe działanie nie powoduje ograniczeń w realizacji funkcji systemu. (E1)

Dla każdej klasy elementu można przypisać wartość liczbowa w następujący sposób:

- Klasa E4, wartość $E=4$;
- Klasa E3, wartość $E=3$;
- Klasa E2, wartość $E=2$;
- Klasa E1, wartość $E=1$.

Poszczególne elementy niezależnie od ich ważności mogą pełnić kilka funkcji, dlatego też klasa elementu została zmodyfikowana z wykorzystaniem współczynnika korekcyjnego e_f określonego w następujący sposób:

$$e_f = \frac{(f_e - 1)}{45} + 1 \quad (6)$$

gdzie f_e jest liczbą funkcji, który dany element realizuje.

Współczynnik korekcyjny został uwzględniony w ocenie ważności skutków potencjalnych wad w sposób opisany w dalszej części tego rozdziału. Przyjęta zależność jest słuszna dla liczby funkcji ≤ 10 .

Potencjalne wady ze zbioru wad $z_i \in Z$, które należy utożsamiać z zakłóceniami systemu można sklasyfikować według skutków, które mogą wywołać. Potencjalne wady systemu możemy podzielić na następujące klasy:

1. Wady, które powodują krytyczne skutki dla systemu. System przestaje realizować swoje podstawowe funkcje (W4).

Wady powodujące krytyczne skutki dla systemu to wady, które powodują utratę podstawowych cech elementów systemu. W ogólnym przypadku są to wady, które powodują utratę właściwości i cech fizyko-chemicznych (zmiana kształtu na skutek złamania, trwałych odkształceń, pęknięć, wykruszeń), utrata własności fizycznych (np. wykonanych z gumy lub) czy zmiana struktury i utrata własności chemicznych (zmiana składu cieczy technicznych, zanieczyszczenia). Wady tego typu pojawiają się zazwyczaj przy ponadnormatywnych obciążeniach, wadach materiałowych, błędach konstrukcyjnych i technologicznych oraz przy nieprawidłowej eksploatacji systemu. Mogą pojawić się również na skutek braku lub nieodpowiednich czynnościach obsługowych.

2. Wady, które powodują degradację funkcji, które system realizuje, ale podstawowe funkcje są realizowane, chociaż z poważnymi ograniczeniami (W3).

Wady, które mogą powodować niewłaściwe działanie systemu, ale pozwalają realizować zdefiniowane funkcje. Takimi wadami mogą być: zużycie, korozja, pęknięcia, zmiana własności fizyko-chemicznych w zaawansowanym stopniu. Wady tego rodzaju pojawiają się podczas normalnej eksploatacji lub przy braku lub nieodpowiednich czynnościach obsługowych.

3. Wady, które powodują niewielkie ograniczenia w realizowanych funkcjach systemu (W2).

Są to wady, które można określić w podobny sposób jak dla kategorii W3, tyle, że w początkowych lub mało zaawansowanym stadium.

4. Wady, które w niewielkim stopniu lub wcale nie ograniczają realizowanych funkcji elementu (W1).

Do każdej z wymienionych kategorii zaliczyć można również takie, które czasowo uniemożliwiają realizację funkcji systemu na skutek oddziaływania czynników zewnętrznych (np. temperatury) i mogą występować tymczasowo, gdyż przy zaniku oddziaływania pewnych czynników zewnętrznych w pełni mogłyby realizować zamierzone funkcje.

Dla każdej klasy wady w_i można przypisać wartość liczbową w następujący sposób:

- Klasa W4, wartość $W=4$;
- Klasa W3, wartość $W=3$;
- Klasa W2, wartość $W=2$;
- Klasa W1, wartość $W=1$.

Przedstawiona powyżej klasyfikacja elementów wykorzystuje stosunkowo wąską skalę oceny (1-4), co przy pojawieniu się tych samych potencjalnych wad dla tej samej klasy elementów może się okazać mało efektywne w ocenie skutków potencjalnych wad. W związku z tym zastosowano dodatkową wagę, która różnicuje ważność elementów ze względu na wpływ potencjalnych wad w danym elemencie na inne elementy systemu. Wspomniany współczynnik korekcyjny można przedstawić w sposób następujący:

$$w_i = \frac{k}{5 \cdot n} + 1 \quad (7)$$

gdzie: k jest liczbą elementów, na które potencjalna wada pojawiająca się w rozpatrywanym elemencie może mieć wpływ, n jest całkowitą liczbą elementów występujących w rozpatrywanym systemie.

Wskaźnik znaczenia skutków wady zaproponowano w postaci następującej zależności:

$$S = \left(\frac{2.5 Wi + 0.5 Ei}{\frac{1}{Ei \cdot e_f} + \frac{1}{Wi \cdot w_i}} \right) - 0.5 \quad (8)$$

gdzie: Wi określa klasę wady W elementu E , na które potencjalna wada pojawiająca się w rozpatrywanym elemencie może mieć wpływ, n jest całkowitą liczbą elementów występujących w rozpatrywanym systemie.

Wartość minimalna wskaźnika S wynosi 1, natomiast maksymalna 28.3

Rozpatrywany system może realizować kilka funkcji, które mogą różnić się stopniem złożoności oraz ważności. W związku z tym zaproponowano podział realizowanych funkcji systemu w następujący sposób:

- Funkcje główne f_g
- Funkcje drugorzędne f_d
- Funkcje pomocnicze f_p

System składający się z określonych elementów może realizować różne funkcje wykorzystując wszystkie elementy lub tylko część elementów. W związku z tym zaproponowano, aby znaczenie poszczególnych wad dla poszczególnych funkcji rozpatrywać oddzielnie. Następnie całkowite znaczenie poszczególnych wad dla wszystkich funkcji systemu zostanie obliczone za pomocą średniej ważonej:

$$S_c = S_{f_g} + \frac{1}{f} S_{f_d} + \frac{1}{3f} S_{f_p} \quad (9)$$

gdzie: $f = \sum f_g + \sum f_d + \sum f_p$, jest liczbą wszystkich funkcji realizowanych przez system

4.3.4 Analiza wrażliwości wskaźnika znaczenia skutków wady

Funkcja opisująca wskaźnik znaczenia skutków wad przedstawiona równaniem (8) została przyjęta empirycznie jako nieliniowa w celu wyeliminowania jednakowych wartości wskaźnika dla różnych kombinacji klasy wady W_i oraz klasy elementów E_i . wraz z odpowiednimi wskaźnikami korekcyjnymi e_f oraz w_i . Analizę wrażliwości przeprowadzono dla wartości granicznych (Saltelli i inni, 2004), (Saltelli i inni, 2008) klas wady i elementów oraz ich współczynników korekcyjnych. Klasy wady W_i oraz elementu E_i przyjmują wartości dyskretne:

$$W_i, E_i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (10)$$

Współczynniki korekcyjne e_f oraz w_i wartości ciągłe:

$$w_i, e_f \in [1, 1.2] \quad (11)$$

Sprawdzono wartości funkcji przedstawionej w równaniu (8) dla następujących wartości klasy wady i elementu oraz współczynników korekcyjnych dla wartości granicznych wg schematu przedstawionego w tabeli 10.

Tabela 10. Wartości graniczne klas wady i elementu oraz współczynników korekcyjnych (źródło: opracowanie własne)

E_i	e_f	W_i	w_i	S	Ranking
4	1.2	4	1	25.68	1
4	1	4	1.2	25.68	1
4	1	4	1	23.5	2
4	1	3	1	19.21	3
4	1	2	1	14.16	6
3	1	4	1	15.78	5
3	1.2	4	1.2	19.04	4
3	1	3	1	13.00	7
3	1	2	1	9.70	9
2	1.2	4	1.2	10.70	8
2	1	4	1	8.83	10

Przedstawione wyniki analizy wrażliwości wskazują, że jedynie dla elementów krytycznych klasy (E4) i wad krytycznych (W4) uzyskano identyczne wartości wskaźnika znaczenia wady S . Z praktycznego punktu widzenia jest to akceptowalne, gdyż obie wartości są bliskie wartości maksymalnych i żadna wada tej klasy pojawiająca się w elemencie tej klasy nie zostanie pominięta. Dla innych kombinacji klasa elementu (ważność dla systemu) jest uprzywilejowana, dlatego też dopiero wystąpienie wady krytycznej klasy W4 w elemencie klasy E3 jest klasyfikowane wyżej niż wystąpienie wady W2 w elemencie klasy W4.

4.3.5 Subiektywne prawdopodobieństwo wystąpienia wady

Określenie prawdopodobieństwa wystąpienia potencjalnej wady dla poszczególnych elementów systemu jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe w przypadku nowo projektowanych systemów lub całkowitego braku historii uszkodzeń i awarii istniejących systemów. Nawet w przypadku systemów, które wykorzystują ogólnodostępne elementy jest to poważny problem. Z tego powodu termin „prawdopodobieństwo wystąpienia wady” używany w tradycyjnej analizie FMEA będzie w zaproponowanej metodzie traktowanych jako pewnego rodzaju predyktor określający skłonność do wystąpienia wady w danym elemencie systemu. Przy czym termin „subiektywne prawdopodobieństwo” należy rozumieć jako przewidywanie wystąpienia potencjalnej wady w elemencie systemu, bez odniesienia do konkretnych wad, które mogą się pojawić. W przypadku stosowania typowych elementów układów hydraulicznych można posłużyć się dostępnymi wskaźnikami awarii (*failure rate*), które zostały przedstawione w raporcie US Navy (Naval Surface Warfare Center, 2011). Praktyczne zastosowanie wymienionych wskaźników zostało wykorzystane w pracy (Fabis-Domagala i inni, 2021) do określenia krytyczności układów hydraulicznych. O ile w przypadku układów hydraulicznych wskaźniki awarii są dostępne, to należy mieć na uwadze fakt, że są one obarczone niepewnościami wynikającymi z kilku powodów. Nawet typowe elementy układów hydraulicznych takie jak zawory mogą się różnić indywidualnymi rozwiązaniami

technicznymi, które mogą znacznie wpływać na wartość wskaźników niezawodności. Natomiast w przypadku systemów czysto mechanicznych, które charakteryzują się indywidualnymi i niepowtarzalnymi rozwiązaniami jakiegokolwiek dane są praktycznie niedostępne. W pewnym stopniu można określić prawdopodobieństwo wystąpienia wady dla typowych elementów maszyn takich jak łożyska, koła zębate czy też elementy złączne. W związku z powyższymi wymienionymi problemami w opracowanej metodzie zaproponowano wykorzystanie bazowego współczynnika określającego przewidywane prawdopodobieństwo wystąpienia wady (bez przypisywania konkretnych wartości dla poszczególnych wad) oraz współczynników korygujących. Współczynnik bazowy został określony na podstawie teorii niezawodności, według której, niezależnie od rodzaju połączenia elementów składowych systemu, niezawodność systemu zależy w ogólności od liczby elementów systemu (Birolini, 1997). W systemie składającym się z wielu elementów, powiązanych ze sobą złożonymi relacjami występuje znacznie więcej potencjalnych źródeł awarii niż w przypadku prostego systemu. Analiza danych dotyczących niezawodności układów mechanicznych oraz hydraulicznych przedstawionych w (Naval Surface Warfare Center, 2011) wykazała, że niezależnie od rozwiązań konstrukcyjnych pewne, określone czynniki mają wpływ na wskaźniki niezawodności. Tymi czynnikami są warunki zewnętrzne, tolerancje i dokładność wykonania oraz ogólnie rozumiane warunki pracy. Osobnymi czynnikami, które, oprócz wymienionych wcześniej czynników eksploatacyjnych oraz technologicznych, mają wpływ na niezawodność elementów są stosowane rozwiązania techniczne. Jest rzeczą oczywistą, że w elementach stosujących nowe i niesprawdzone rozwiązania techniczne prawdopodobieństwo wystąpienia wady jest zdecydowanie większe niż w przypadku rozwiązań znanych i wcześniej stosowanych. W proponowanej metodzie założono, że szacowane prawdopodobieństwo wystąpienia wady w ogólnym przypadku będzie zależało od liczby elementów występujących w systemie, ilości pełnionych funkcji przez dany element oraz rodzaju stosowanych rozwiązań technicznych. Dodatkowo, zastosowano współczynniki korygujące związane z warunkami eksploatacji oraz charakterem pracy rozpatrywanego elementu. Zakładając, że każdy element układu może być traktowany jako podsystem większego systemu, elementarnymi składnikami systemu najniższego poziomu możemy traktować pojedyncze, niepodzielne części. Predyktor subiektywnego prawdopodobieństwa wystąpienia potencjalnej wady można określić następująco:

$$O = \alpha \cdot (n_e + 0.5 f_e) \cdot \prod \lambda_i - 0.5 \quad (12)$$

gdzie:

n_e jest liczbą elementów (niepodzielnych części) systemu,

f_e jest liczbą funkcji, które rozpatrywany element realizuje,

α - współczynnik uwzględniający stosowane rozwiązania techniczne

λ_i – współczynniki korekcyjne:

λ_p współczynnik korekcyjny uwzględniający charakter pracy elementu

λ_s współczynnik korekcyjny uwzględniający warunki środowiskowe

λ_t współczynnik korekcyjny uwzględniający tryb pracy elementu.

Wymienione w równaniu 12 współczynniki korekcyjne zostały zdefiniowane na podstawie dostępnych danych (Naval Surface Warfare Center, 2011), i zostały określone w sposób opisany poniżej.

Współczynnik α uwzględnia zastosowane rozwiązania techniczne i uzależnia prawdopodobieństwo wystąpienia potencjalnej wady od zastosowanych rozwiązań technicznych. Współczynnik ten został zdefiniowany następująco:

- $\alpha = 3$, dla elementów, które wykorzystują nowatorskie i unikalne rozwiązania techniczne w zakresie technologii wykonania i rozwiązań konstrukcyjnych;
- $\alpha = 2$, dla elementów, które wykorzystują niestosowane wcześniej w danych zastosowaniach rozwiązania techniczne w zakresie technologii wykonania lub rozwiązania konstrukcyjne;
- $\alpha = 1$, dla elementów, które wykorzystują znane rozwiązania techniczne w zakresie technologii wykonania i rozwiązań konstrukcyjnych.

Współczynnik korekcyjny uwzględniający charakter pracy elementu λ_p jest związany z rodzajem pracy rozważanego elementu. Dostępne dane wskazują, że wskaźniki niezawodności zależą od rodzaju wzajemnych relacji między współpracującymi elementami. Wiąże się to również z warunkami technicznymi jakie takie elementy muszą spełniać. Wzajemna współpraca elementów wymaga stosowania odpowiednich technologii w celu odpowiedniego przygotowania współpracujących powierzchni. Dlatego też współczynnik λ_p określono w sposób następujący:

- $\lambda_p = 1.75$, dla elementów, które wykonują wzajemne ruchy posuwisto-zwrotne, oznacza to jednocześnie wysokie warunki wykonania i dokładności powierzchni współpracujących elementów;
- $\lambda_p = 1.5$, dla elementów, które wykonują wzajemne ruchy obrotowe, oznacza to jednocześnie średnie warunki wykonania i dokładności powierzchni współpracujących elementów;
- $\lambda_p = 1$, dla elementów, które nie są powiązane z innymi elementami relacjami kinematycznymi, oznacza to jednocześnie typowe warunki wykonania elementu i dokładności powierzchni współpracujących elementów;

Współczynnik korekcyjny uwzględniający warunki środowiskowe λ_s jest związany bezpośrednio ze środowiskiem pracy rozważanego elementu (zapylenie, wilgotność, promieniowanie, chemicznie aktywne środowisko). Współczynnik λ_s określono w sposób następujący:

- $\lambda_s = 1.15$ chemicznie aktywne środowisko;
- $\lambda_s = 1.1$ umiarkowane czynniki środowiskowe;
- $\lambda_s = 1$ przy braku szkodliwych czynników środowiskowych.

Współczynnik korekcyjny uwzględniający tryb pracy elementu λ_t jest zdefiniowany następująco:

- $\lambda_t = 1.15$ praca ciągła;
- $\lambda_t = 1.1$ praca przerywana;
- $\lambda_t = 1$ praca sporadyczna.

4.3.6 Ocena możliwości wykrycia wady

Do oceny wykrycia wady wykorzystano dwa współczynniki związane z możliwościami wykrycia potencjalnej wady, określone w następujący sposób:

$$D = d_a d_d \quad (13)$$

Współczynnik d_a związany jest z możliwościami wykrycia wady zdefiniowano w następujący sposób:

- $d_a = 2$, gdy wykrycie wady nie jest możliwe bezpośrednio w systemie (można to rozumieć jako brak możliwości wykrycia wady bez demontażu);
- $d_a = 1$, gdy wykrycie wady jest możliwe bezpośrednio w istniejącym systemie (można to rozumieć jako możliwość wykrycia wady bez demontażu części).

Współczynnik d_d związany jest ze sposobem wykrycia wady:

- $d_d = 4$, gdy wykrycie wady wymaga opracowania procedury diagnostycznej;
- $d_d = 3$, gdy wykrycie wady jest możliwe gdy procedura diagnostyczna wymaga stosowania przyrządów diagnostycznych;
- $d_d = 2$, gdy wykrycie wady jest możliwe gdy procedura diagnostyczna nie wymaga przyrządów diagnostycznych;
- $d_d = 1$, gdy wykrycie wady jest możliwe bez stosowania jakichkolwiek urządzeń i procedur diagnostycznych.

W przypadku, gdy rozważany jest nowo projektowany system, procedurę diagnostyczną należy utożsamiać z metodami modelowania matematycznego obiektów fizycznych.

4.3.7 Ocena kosztów występowania wady

Wskaźnik kosztów wystąpienia potencjalnej wady został już wcześniej zauważony w literaturze (Lo i inni, 2018), (Jahangoshai Rezaee i inni, 2017) jako jeden z niezbędnych czynników oceny skutków potencjalnych wad. W proponowanej metodzie wskaźnik oceny kosztów jest definiowany na podstawie czterech współczynników, które uwzględniają koszt wytworzenia elementu, koszty wymiany lub naprawy skutków potencjalnej wady, oraz dodatkowe skutki ekonomiczne wynikające z wystąpienia wady (np. brak dochodów wynikających z przestojów związanych z naprawą lub diagnostyką). Wskaźnik kosztów określono w następujący sposób:

$$C = \sum c_i = c_m + c_r + c_a + c_s \quad (14)$$

Współczynnik związany z kosztami wytworzenia c_m uzależnia koszt wytworzenia elementu systemu w zależności od wielkości tolerancji wymiarów i kształtu oraz dokładności powierzchni. Z analizy literatury (Dietrych, 2001) wynika, że koszty produkcji zwiększają się w postępie geometrycznym wraz ze zwiększaniem dokładności i jakości powierzchni. W związku z tym współczynnik ten określono następująco:

- $c_m = 4$, gdy współczynnik korekcyjny uwzględniający charakter pracy elementu $\lambda_p = 1.75$.
- $c_m = 2$, gdy współczynnik korekcyjny uwzględniający charakter pracy elementu $\lambda_p = 1.5$;
- $c_m = 1$, gdy współczynnik korekcyjny uwzględniający charakter pracy elementu $\lambda_p = 1$;

Współczynnik związany z kosztami wymiany/naprawy c_r określono następująco:

$c_r = 4$, w przypadku wysokich kosztów wymiany/naprawy elementów;
 $c_r = 3$, w przypadku średnich kosztów wymiany/naprawy elementów;
 $c_r = 2$, w przypadku niskich kosztów wymiany/naprawy elementów;
 $c_r = 1$, gdy współczynnik skutki potencjalnej wady nie wymagają wymiany/naprawy elementu.

Współczynnik związany z dodatkowymi kosztami c_a określono następująco:

$c_a = 4$, w przypadku wysokich dodatkowych kosztów ekonomicznych;
 $c_a = 3$, w przypadku średnich dodatkowych kosztów ekonomicznych;
 $c_a = 2$, w przypadku niskich dodatkowe kosztów ekonomicznych;
 $c_a = 1$, gdy nie występują dodatkowe koszty ekonomiczne.

Współczynnik związany z kosztami materiałowymi elementu c_s określono następująco:

$c_s = 2$, zastosowanie nietypowych materiałów, duże rozmiary elementu;
 $c_s = 1.5$, zastosowanie typowych materiałów, duże rozmiary elementu;
 $c_s = 1$, zastosowanie typowych materiałów, niewielkie rozmiary elementu.

4.3.8 Ocena krytyczności

Ocena krytyczności potencjalnych wad jest typowym wielokryterialnego zagadnienia decyzji (Aruldoss i inni, 2013), (Velasquez i inni, 2013), (Taherdoost i inni, 2023). Stosowane metody mogą pomijać kombinacje ekstremalnych wartości dla poszczególnych wskaźników FMEA co w konsekwencji może prowadzić do sytuacji znanej w literaturze jako *teoria czarnego łabędzia* (Taleb, 2011). W szczególności w przypadku wystąpienia wady o wysokiej wartości jej ważności oraz niskich wartości pozostałych wskaźników może ona zostać pominięta podczas klasyfikacji krytyczności wad. W związku z tym zaproponowano podział przestrzeni decyzyjnej, która w ogólnym przypadku może być określona następująco:

$$CR = \{S, O, D, C\} \quad (15)$$

na trzy mniejsze, przy czym wszystkie tworzą komplementarny opis systemu w zaproponowanej modyfikacji analizy FMEA. Pierwsza przestrzeń decyzyjna określona jest poprzez wady które uniemożliwiają realizowanie podstawowych funkcji systemu. Przestrzeń decyzyjną dla takiego przypadku można określić następująco:

$$CR_{mod1} = \{S_{kr}, O, D, C\} \quad (16)$$

gdzie: S_{kr} jest krytyczną wartością znaczenia skutku wady, która uniemożliwia realizację funkcji systemu.

W drugiej określono wartość pozostałych wskaźników, dla których system realizuje swoje funkcje, ale w sposób, który nie jest akceptowalny ze względu na wartość przewidywanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady, możliwości jej wykrycia czy też kosztów. W związku z tym przestrzeń decyzyjna będzie określona w następujący sposób:

$$CR_{mod2} = \{S, O_{kr}, D_{kr}, C_{kr}\} \quad (17)$$

gdzie: O_{kr} jest krytyczną wartością subiektywnego przewidywanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady, D_{kr} jest krytyczną wartością wykrycia wady, C_{kr} jest krytyczną wartością kosztów

Krytyczne wartości mogą być ustalane stosownie do rozważanego systemu i nie są wartościami stałymi. Mogą przybierać różne wartości w zależności od otoczenia, w którym rozpatrywany system się znajduje.

W wydzielonych przestrzeniach decyzyjnych klasyfikację poszczególnych wad będzie przeprowadzona przy wykorzystaniu analizy TOPSIS (Hwang i inni, 1981) według schematu przedstawionego poniżej:

1. Utworzenie znormalizowanej macierzy decyzyjnej przy jednakowych wagach dla poszczególnych czynników:

$$CR_{mod\ n} = [a_{ij}] \text{ dla } i = cr..n, j = 1..4, a \in \{S, O, D, C\} \quad (18)$$

gdzie:

$$a_{ij} = \frac{cr_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^j cr_{ij}^2}} \quad (19)$$

2. Określenie wektora zawierającego maksymalne wartości dla wskaźników O,D,C:

$$a_{max} = (S_i, O_{max}, D_{max}, C_{max}) \quad (20)$$

3. Określenie wektora zawierającego wartości kryterialne dla wskaźników O,D,C:

$$a_{cr} = (S_i, O_{cr}, D_{cr}, C_{cr}) \quad (21)$$

4. Określenie miary Euklidesowskich do rozwiązania zawierającego wartości maksymalne i kryterialne:

$$d_i^{max} = \sqrt{\sum_{j=1}^j (a_{ij} - a_{max})_{ij}^2} \quad (22)$$

$$d_i^{cr} = \sqrt{\sum_{j=1}^j (a_{ij} - a_{cr})_{ij}^2} \quad (23)$$

5. Obliczenie współczynnika rankingowego:

$$RCR_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (24)$$

Wartość współczynnika $RCR_i = [0,1]$

Pozostała część zbioru decyzyjnego może być rankingowana w ten sam sposób przy założeniu, że wektorem wartości maksymalnych jest wektor zdefiniowany przez wartości kryterialne:

$$a_{cr} = (S_i, O_{cr}, D_{cr}, C_{cr}) \quad (25)$$

a wektorem z wartościami minimalnymi będzie wektorem, w którym czynniki będą miały wartości minimalne

$$a_{min} = (S_i, O_{min}, D_{min}, C_{min}) \quad (26)$$

Metoda TOPSIS może być zbyt złożona do praktycznego zastosowania dlatego też w pracy w pracy dokonano porównania oceny krytyczności przeprowadzonej metodą TOPSIS i Euklidesowską miarą odległości (Liberti i inni, 2017), w którym różnica między wartościami krytycznymi a rozpatrywanymi dla potencjalnej wady jest określona następująco:

$$d_{ij} = \sqrt{(O_d - O_i)^2 + (D_d - D_i)^2 + (C_d - C_i)^2} \quad (27)$$

gdzie: d_{ij} określa odległość rozważanego wektora wskaźników do wektora definiującego poszczególne przestrzenie decyzyjne, wskaźniki S_d, O_d, D_d, C_d określają wartości decyzyjne dla wspomnianych przestrzeni.

4.3.9 Narzędzia zmodyfikowanej analizy FMEA

Na potrzeby pracy opracowano arkusz w systemie MS Excell, w którym wszystkie wskaźniki analizy FMEA są obliczane na podstawie zdefiniowanych parametrów. Po wprowadzeniu danych dotyczących analizowanego systemu, konkretne wartości liczbowe przypisywane są automatycznie w zależności od wprowadzonych danych. Przygotowany arkusz wymaga wprowadzenia następujących danych:

1. Liczba i rodzaje pełnionych przez system funkcji.
2. Składniki analizowanego systemu z podziałem na podstawowe elementy systemu (części)
3. Dodanie typowych wad, jeżeli nie istnieją w zdefiniowanych danych.

Przypisanie elementów do konkretnych funkcji jest realizowane bezpośrednio w arkuszu, łącznie z przypisaniem konkretnych wartości liczbowych. Dane dotyczące systemu są wprowadzane do arkusza poprzez system rozwijanego menu tak jak zostało to przedstawione w tabeli 11.

Tabela 11. Wprowadzone dane dla analizy FMEA (źródło: opracowanie własne)

lp	funkcja systemu	nazwa funkcji	element	część	Ważność wpływu wady										Prawdopodobieństwo wystąpienia wady										Możliwość wykrycia wady					Koszty					
					klasa elementu	wartość klasy elementu	liczba pełnionych funkcji	współczynnik e_f	wada	klasa wady	wartość klasy wady	wpływ na inne elem.	współczynnik W_i	C	wsp. rozw. Techniczne α	wsp. charakteru pracy λ_p	wsp. warunki środowiskowe λ_s	współczynnik char.pracy λ_t	I. części	O	wykrycie wady d_a	sposób wykrycia wady d_d	D	koszty technologii C_M	koszt napr./wymiany C_r	koszty materiału C_S	koszty dodatkowe C_A	C							
1	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik	konstrukcja	E4	4,00	2,00	1,02	pęknięcie	W4	4,00	0,00	1,00	23,76	znane rozw. tech.	1,00	norm. war. wykonania	1,00	umiark. czyn. środ.	1,10	praca ciągła	1,15	2,00	3,30	w systemie	1,00	bez. przyzadów i proc.	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	4,00	8,00	
2	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik	konstrukcja	E2	2,00	2,00	1,02	trw. odksz.	W4	4,00	0,00	1,00	8,97	znane rozw. tech.	1,00	norm. war. wykonania	1,00	umiark. czyn. środ.	1,10	praca ciągła	1,15	2,00	3,30	w systemie	1,00	bez. przyzadów i proc.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00		
3	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik	odpowietrzacz	E1	1,00	2,00	1,02	zatkanie	W4	4,00	1,00	1,02	3,18	znane rozw. tech.	1,00	norm. war. wykonania	1,00	umiark. czyn. środ.	1,10	praca przerywana	1,10	2,00	3,13	w systemie	1,00	bez. przyzadów i proc.	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00		
4	główna	nastawianie kąta natarcia	pompa	korpus	E4	4,00	2,00	1,02	pęknięcie	W4	4,00	3,00	1,05	24,36	znane rozw. tech.	1,00	podw. war. wyk r. obr.	1,50	umiark. czyn. środ.	1,10	praca ciągła	1,15	12,00	24,17	w systemie	1,00	bez. przyzadów i proc.	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	4,00	10,00	
5	główna	nastawianie kąta natarcia	pompa	walek	E4	4,00	3,00	1,04	trw. odksz.	W4	4,00	4,00	1,07	24,83	znane rozw. tech.	1,00	podw. war. wyk r. obr.	1,50	umiark. czyn. środ.	1,10	praca ciągła	1,15	12,00	25,12	poza systemem	2,00	zdef. proc. bez przyż.	2,00	4,00	2,00	2,00	2,00	4,00	10,00	
6	główna	nastawianie kąta natarcia	pompa	tarcza	E4	4,00	3,00	1,04	pęknięcie	W4	4,00	3,00	1,05	24,63	znane rozw. tech.	1,00	wys. war. wyk r. p-z	1,75	brak szkod. czynników	1,00	praca ciągła	1,15	12,00	26,67	poza systemem	2,00	zdef. proc. bez przyż.	2,00	4,00	4,00	2,00	2,00	4,00	12,00	
8	główna	nastawianie kąta natarcia	pompa	tłoczki	E4	4,00	1,00	1,000	zatarcie	W4	4,00	3,00	1,05	24,09	znane rozw. tech.	1,00	wys. war. wyk r. p-z	1,75	brak szkod. czynników	1,00	praca ciągła	1,15	12,00	24,66	poza systemem	2,00	zdef. proc. bez przyż.	2,00	4,00	4,00	2,00	2,00	4,00	12,00	
9	główna	nastawianie kąta natarcia	pompa	uszcz. wałka	E4	4,00	1,00	1,000	pęknięcie	W4	4,00	2,00	1,03	23,89	znane rozw. tech.	1,00	podw. war. wyk r. obr.	1,50	brak szkod. czynników	1,00	praca ciągła	1,15	12,00	21,06	w systemie	1,00	zdef. proc. bez przyż.	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	4,00	10,00	
10																																			
11																																			
12																																			
13																																			
14																																			
15																																			

Wybór funkcji systemu oraz elementu rozważanego systemu przedstawiono na rys. 7 i 8.

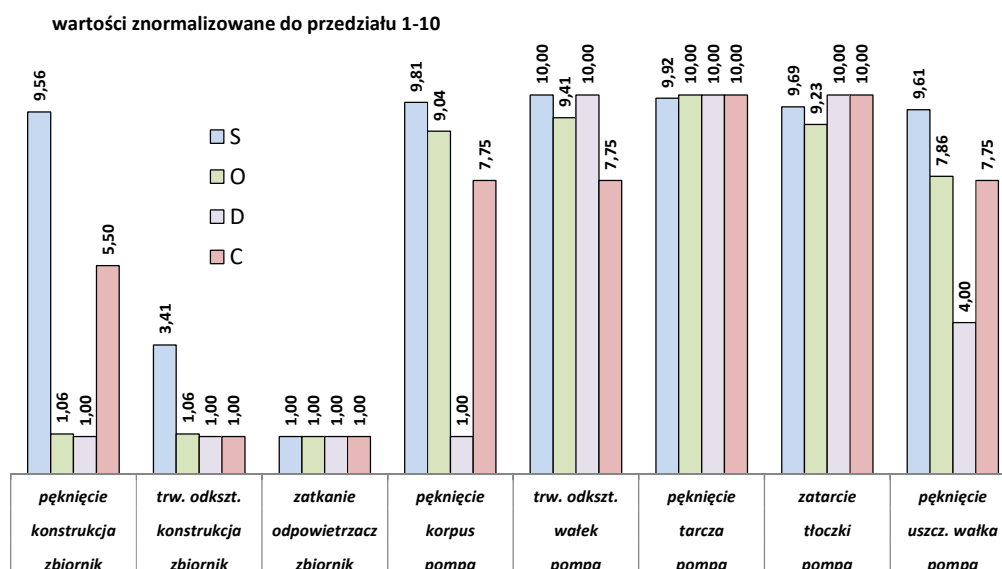
lp	funkcja systemu	nazwa funkcji	element	część	Ważność wpływu wady								
					klasa elementu	wartość klasy elementu	liczba pełnionych funkcji	współczynnik ϕ_f	wada	klasa wady	wartość klasy wady	wpływ na inne elem.	współczynnik w_i
1	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik	konstrukcja	E4	4,00	2,00	1,02	pęknięcie	W4	4,00	0,00	1,00
	główna drugorzędne pomocnicze	nastawianie kąta natarcia	zbiornik	konstrukcja	E2	2,00	2,00	1,02	trw. odszst.	W4	4,00	0,00	1,00
3	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik	odpowietrzacz	E1	1,00	2,00	1,02	zatkanie	W4	4,00	1,00	1,02

Rys. 7. Wybór funkcji analizowanego systemu (źródło: opracowanie własne)

lp	funkcja systemu	nazwa funkcji	element	część
1	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik	konstrukcja
2	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik pompa filtr w. ciśnieniowy zawór zwrotny siłownik akumulator rozdzielacz 3/4 z przelewowy	konstrukcja
3	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik	odpowietrzacz
4	główna	nastawianie kąta natarcia	zbiornik pompa	korpus

Rys. 8. Wybór elementu analizowanego systemu (źródło: opracowanie własne)

Wyniki analizy FMEA dla wprowadzonych danych mogą być przedstawione w sposób graficzny, tak jak przedstawia rysunek 9 lub w postaci tabel z wartościami poszczególnych wskaźników (tabele 12, 13 i 14).



Rys. 9. Wyniki analizy FMEA w postaci wykresu słupkowego (źródło: opracowanie własne)

Tabela 12. Wyniki analizy FMEA dla wad, które uniemożliwiają realizację funkcji systemu (źródło: opracowanie własne)

Realizacja funkcji							
wartość graniczna S=9			S	O	D	C	
1	pompa	walek	trw. odksz.	10,00	9,41	10,00	7,75
2	pompa	tarcza	pęknięcie	9,92	10,00	10,00	10,00
3	pompa	korpus	pęknięcie	9,81	9,04	1,00	7,75
4	pompa	tłoczki	zatarcie	9,69	9,23	10,00	10,00
5	pompa	uszcz. wałka	pęknięcie	9,61	7,86	4,00	7,75
6	zbiornik	konstrukcja	pęknięcie	9,56	1,06	1,00	5,50

Tabela 13. Wyniki analizy FMEA dla wad, które nie są akceptowalne, metoda TOPSIS (źródło: opracowanie własne)

TOPSIS							
wartości graniczne: O=7, D=8, C=8			S	O	D	C	
1	pompa	tarcza	pęknięcie	9,92	10,00	10,00	10,00
2	pompa	tłoczki	zatarcie	9,69	9,23	10,00	10,00
3	pompa	walek	trw. odksz.	10,00	9,41	10,00	7,75
4	pompa	uszcz. wałka	pęknięcie	9,61	7,86	4,00	7,75
5	pompa	korpus	pęknięcie	9,81	9,04	1,00	7,75

Tabela 14. Wyniki analizy FMEA dla wad, które nie są akceptowalne, miara Euklidesowa (źródło: opracowanie własne)

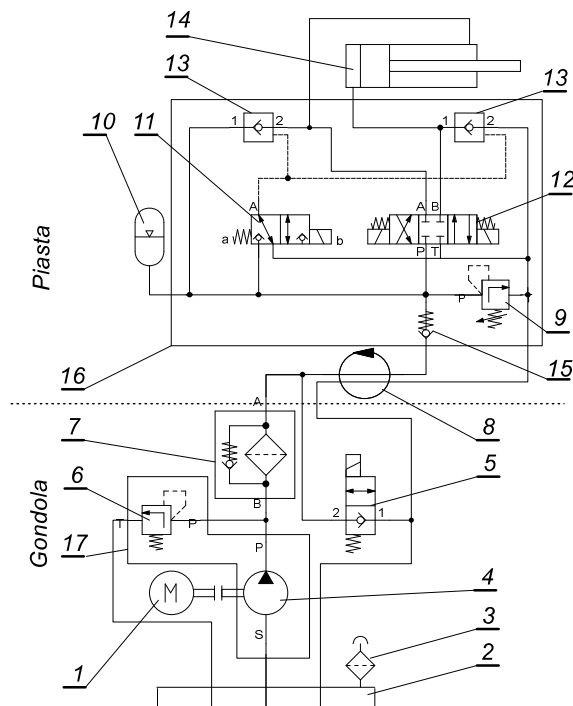
ODL. EUKLIDESOWA							
wartości graniczne: O=7, D=8, C=8			S	O	D	C	
1	pompa	tarcza	pęknięcie	9,92	10,00	10,00	10,00
2	pompa	tłoczki	zatarcie	9,69	9,23	10,00	10,00
3	pompa	walek	trw. odksz.	10,00	9,41	10,00	7,75
4	pompa	uszcz. wałka	pęknięcie	9,61	7,86	4,00	7,75
5	pompa	korpus	pęknięcie	9,81	9,04	1,00	7,75

5 Przykład zastosowania zmodyfikowanej analizy FMEA

5.1 Analiza FMEA układu hydraulicznego

5.1.1 Opis układu hydraulicznego

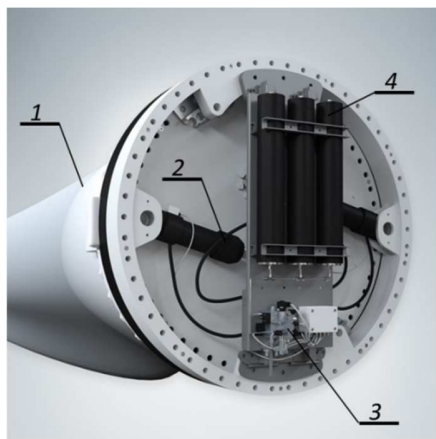
Praktyczne zastosowanie opracowanej modyfikacji metody FMEA zostało przedstawione na przykładzie analizy układu hydraulicznego wykorzystywanego w turbinach wiatrowych, którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Schemat układu hydraulicznego 1 – silnik elektryczny, 2 zbiornik oleju, 3 odpowietznik i filtr powietrza, 4 – pompa łopatkowa o stałym wydatku, 5 – rozdzielacz jednostronnie szczelny, 7 - filtr wysokociśnieniowy z zaworem zwrotnym, 8 – złącze obrotowe, 9 – zawór przelewowy, sterowany, 10 – akumulator przeponowy, 11 - rozdzielacz suwakowy, 12 – rozdzielacz suwakowy, czterodrogowy trójpołożeniowy, 13 - zawór zwrotny sterowany, 14 – siłownik hydrauliczny dwustronnego działania, 15 – zawór zwrotny, 16 – blok zaworów, 17 - blok pompy (źródło: opracowanie własne)

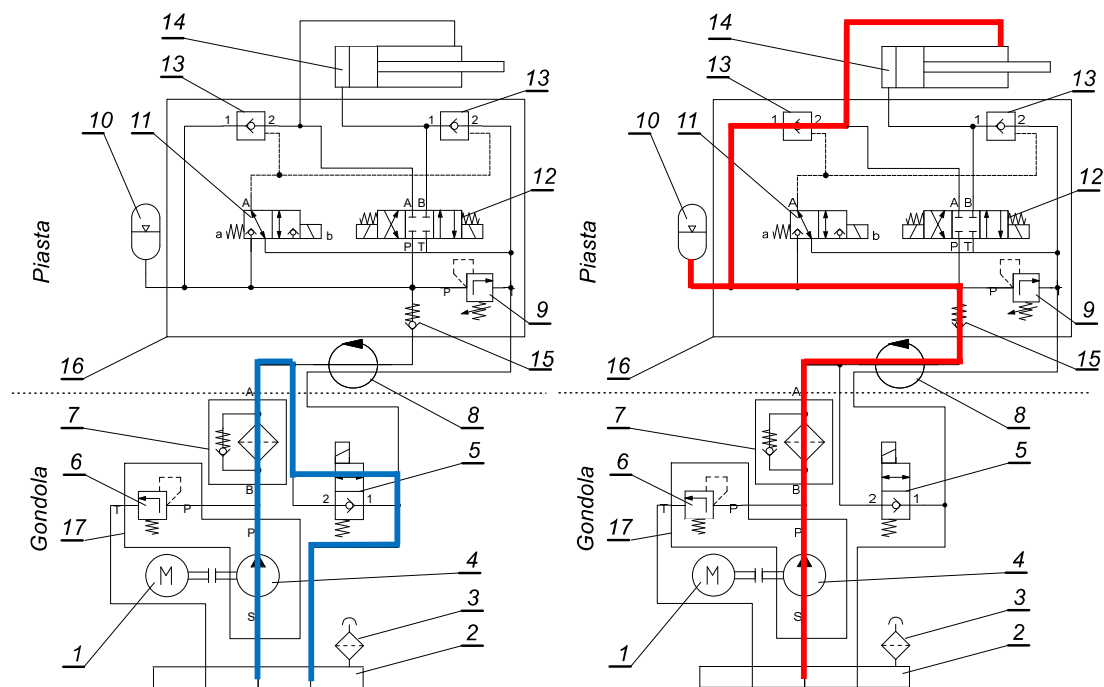
W praktyce mogą być stosowane układy z dedykowanymi elementami hydrauliki siłowej, jednak na potrzeby pracy oraz zweryfikowania opracowanej metodyki założono, że analizowany układ jest zbudowany przy wykorzystaniu typowych elementów hydraulicznych dostępnych na rynku.

Przykładowa implementacja wybranego układu hydraulicznego została przedstawiona na rys.11. Układ hydrauliczny jest częściowo umieszczony w gondoli (zasilacz, składający się z silnika elektrycznego, zbiornika z olejem oraz pompy) oraz w obracającym się wirniku (zawory, siłownik hydrauliczny). Energia ciśnienia z zasilacza hydraulicznego dostarczana jest do wirnika poprzez złącze obrotowe.



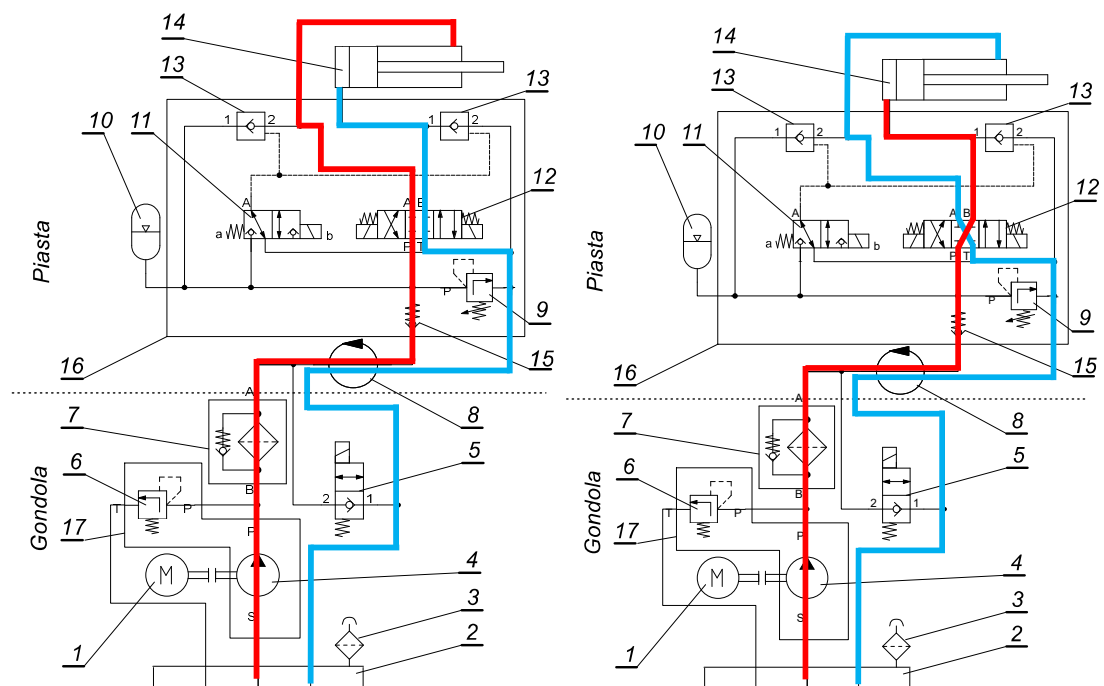
Rys. 11. Elementy układu sterowania kątem natarcia turbiny wiatrowej firmy Hawe Hydraulik: 1 – łopata turbiny, 2 – siłownik hydrauliczny, 3 – blok zaworowy, 4 – zespół akumulatorów (źródło: (Fluid Power World))

Układ hydrauliczny sterowania kątem natarcia łopat turbiny wiatrowej zasadniczo ma na celu odpowiednie ustawianie kąta natarcia łopat w stosunku do panujących warunków w celu uzyskania jak największej efektywności, ochrony turbiny (wyhamowywania turbiny) w przypadku przekroczenia prędkości wiatru oraz awaryjnego wyhamowania w przypadku braku zasilania (brak ciśnienia w układzie hydraulicznym). Przedstawiony układ hydrauliczny jest tylko i wyłącznie uproszczoną wersją rzeczywistego układu, który może zawierać wiele dodatkowych elementów związanych z zabezpieczeniem turbiny czy też wymogów bezpieczeństwa. W praktyce stosuje się różne rozwiązania układów, o różnym stopniu skomplikowania wykorzystujące różne elementy hydrauliczne. Inne przykłady układów hydraulicznych wykorzystywanych do sterowania kątem natarcia łopaty są przedstawione w pracach: (Cho i inni, 2020), (Wenting i inni, 2020), (Asmussen i inni, 2021), (Stirrup i inni). Układ częściowo jest umieszczony w nieruchomej gondoli, podczas gdy siłowniki sterujące kątem natarcia w piaście. W gondoli znajduje się zasilacz hydrauliczny (silnik, pompa, zbiornik) oraz część zaworów. W piaście wirnika znajdują się siłowniki hydrauliczne, blok zaworowy oraz akumulator. Część układu znajdująca się w piaście jest połączona z resztą układu poprzez złącze obrotowe 5. Układ może pracować w stanie bez zasilania układu nastawy kąta natarcia łopat turbiny. W takiej konfiguracji rozdzielacz 5 jest ustawiony w pozycji pozwalającej na swobodny przepływ cieczy do zbiornika. W celu zasilenia układu sterowania kątem natarcia, zawór 5 musi zostać przełączony, tak aby zamknąć przepływ do zbiornika. W pierwszym etapie cylinder hydrauliczny jest w początkowej pozycji (tłoczek całkowicie wsunięty), przedstawionym na rysunku poniżej. W takiej konfiguracji zawór 5 jest przełączony do pozycji zamykającej przepływ do zbiornika a olej przez zawór zwrotny 15 przepływa do akumulatora 10 oraz dalej przez sterowany zawór zwrotny 13 do cylindra hydraulicznego 14 od strony tłoczyska. Po naładowaniu akumulatora hydraulicznego kąt natarcia łopat turbiny może być ustawiany poprzez rozdzielacz 12. W zależności od położenia suwaka kąt natarcia może być nastawiany poprzez odpowiednie wysunięcie tłoczyska cylindra 14. Przepływ cieczy w układzie przy nastawie kąta natarcia przedstawiono na rys.14 i 15.



Rys. 12. Praca układu na biegu jałowym (źródło: opracowanie własne)

Rys. 13. Ładowanie akumulatora (źródło: opracowanie własne)



Rys. 14. Zasilanie siłownika od strony tłoczyska (źródło: opracowanie własne)

Rys. 15. Zasilanie siłownika od strony tłoka (źródło: opracowanie własne)

Wyhamowanie turbiny następuje poprzez całkowite wsunięcie tłoczyska do cylindra przez co kąt natarcia łopatek zostaje ustawiony w pozycji, w której nie jest generowana siła nośna na łopatkach turbiny. W takim przypadku, żaden z zaworów nie jest zasilany i wszystkie są ustawione w pozycji

zerowej. Część układu od strony pompy jest zamknięta zaworem zwrotnym 15. Energia zgromadzona w akumulatorze hydraulicznym jest wykorzystywana do ruchu tłoczyska, tak aby tłoczysko zostało całkowicie wsunięte do cylindra. Pojemność akumulatora jest tak dobrana, aby zapewnić wypełnienie komory cylindra od strony tłoczyska. Sterowane zawory zwrotne 13 umożliwiają utrzymanie nastawionego kąta natarcia turbiny w przypadku przełączenia zaworu 11.

Jednym z wymagań układów hydraulicznych stosowanych w turbinach wiatrowych jest brak przecieków zewnętrznych, gdyż jest to jeden z głównych czynników zwiększających zagrożenia pożarowe turbin wiatrowych. Publikacje z zakresu analizy uszkodzenia turbin wiatrowych (Lee i inni, 2020), (Sun i inni, 2019), (Shaik i inni, 2023) wskazują układy hydrauliczne jako jedne z elementów, które same w sobie nie inicjują pożarów turbin, ale są czynnikiem znacznie zwiększających to zagrożenie ze względu na łatwopalność oleju hydraulicznego.

5.1.2 Elementy układu hydraulicznego.

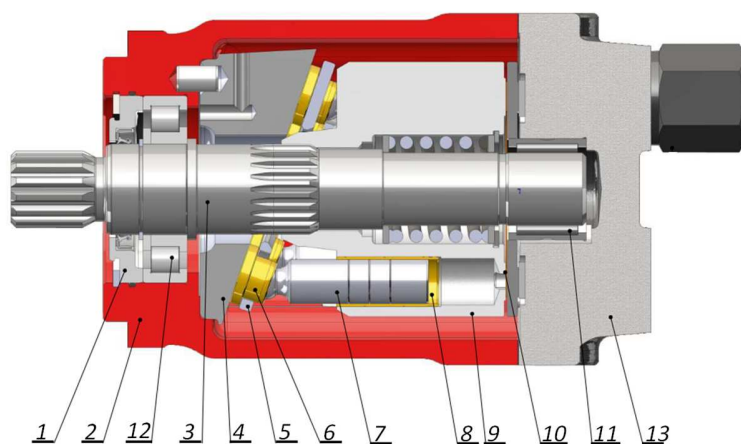
Jak wspomniano w poprzednim rozdziale na potrzeby analizy wykorzystano typowe (katalogowe, dostępne na rynku) elementy hydrauliki siłowej. Poniżej przedstawiono opis poszczególnych elementów wykorzystanych w analizie FMEA:

1. Zbiornik wraz z filtrem powietrza i odpowietrzacz.

Zbiornik służy do magazynowania oleju oraz w pewnym zakresie do chłodzenia oleju powracającego z układu. Podczas pracy układu hydraulicznego normalnym zjawiskiem jest proces nagrzewania się oleju na dławienia przepływu oleju w elementach układu hydraulicznego. Odpowietrzacz filtruje powietrze dostające się do zbiornika oraz zapewnia swobodny przepływ powietrza oraz oparów oleju z/do zbiornika.

2. Pompa

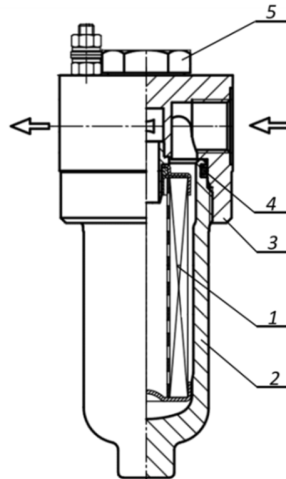
Pompa jest źródłem energii ciśnienia w układzie hydraulicznym. Napędzana przez silnik elektryczny zamienia energię mechaniczną na energię ciśnienia oleju. W układzie zastosowano pompę łopatkową o stałej wydajności z dziewięcioma tłoczkami, której schemat przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Pompa tłoczkowa, 1– pakiet uszczelniający, 2 – korpus pompy, 3 – wałek pompy, 4 – tarcza pompy, 5 – płytka ustalająca, 6 – stopka, 7 – tłoczek, 8 – tuleja tłoczka, 9 - bęben cylindrowy, 10 – tarcza rozrządu, 11,12 – łożyska wałka, 13 – pokrywa pompy (źródło: (Hydraulics M+S))

3. Filtr wysokiego ciśnienia

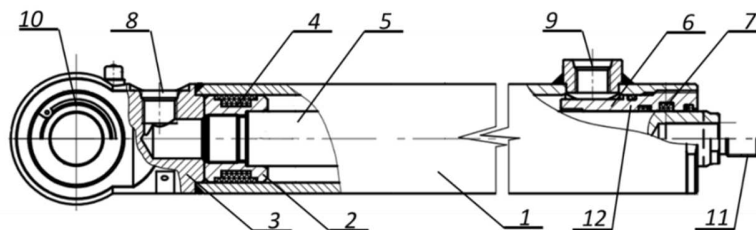
Zadaniem filtra wysokiego ciśnienia jest zatrzymywanie zanieczyszczeń występujących w oleju hydraulicznym. Filtr wyposażony jest również w zawór zwrotny, który umożliwia przepływ cieczy w przypadku zablokowania filtra. Schemat filtra wysokiego ciśnienia przedstawiono na rysunku 17.



Rys. 17. Filtr wysokociśnieniowy. 1- wkład filtra, korpus dolny, 3 – korpus górny wraz z przyłączami, 4 – uszczelnienie, 5 – wskaźnik zanieczyszczenia filtra (źródło: (Eaton))

4. Siłownik hydrauliczny

Zadaniem siłownika hydraulicznego jest zamiana energii ciśnienia na ruch posuwisto-zwrotny. W przedstawionym układzie hydraulicznym zastosowano siłownik dwustronnego działania, którego schemat przedstawiono poniżej.

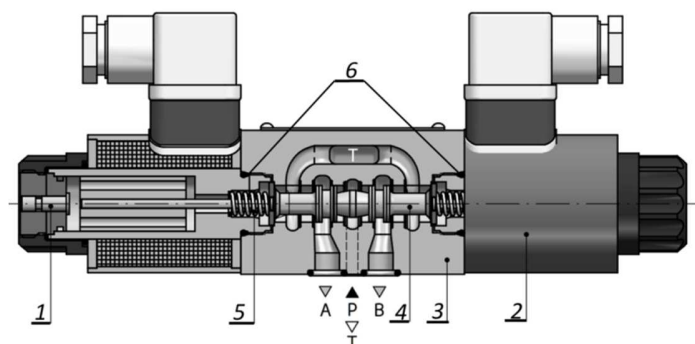


Rys. 18. Siłownik hydrauliczny, 1- cylinder, 2 – tłok, 3 – dno spawane do cylindra, 4 – pakiet uszczelnień tłoka 5 – tłoczek, 6 – dławnica, 7 – pakiet uszczelnień tłoczyśka, 8,9 – przyłącza, 10 – łożysko ucha, 11 – gwintowany czop, 12 – uszczelnienie dławnicy (źródło: (Ponar Wadowice SA))

W przedstawionym schemacie siłownika, gwintowany czop służy do mocowania ucha wraz z łożyskiem.

5. Rozdzielacz suwakowy, czterodrogowy trójpołożeniowy

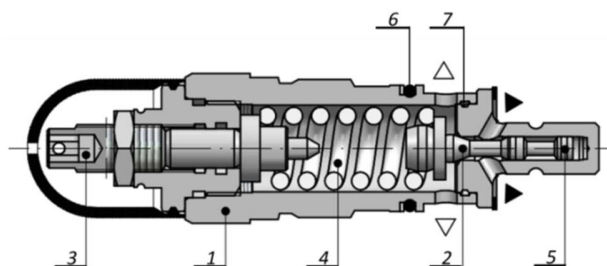
Rozdzielacz suwakowy jest zaworem służącym do zmiany kierunku przepływu cieczy w układzie hydraulicznym co skutkuje zmianą kierunku ruchu siłownika.



Rys. 19. Rozdzielacz czterodrogowy, trójpołożeniowy, 1,2 – elektromagnesy, 3 – korpus zaworu, 4 – suwak, 5 – sprężyny ustalające położenie neutralne, 6 – pierścienie uszczelniające (źródło: (Ponar Wadowice SA))

6. Zawór przelewowy

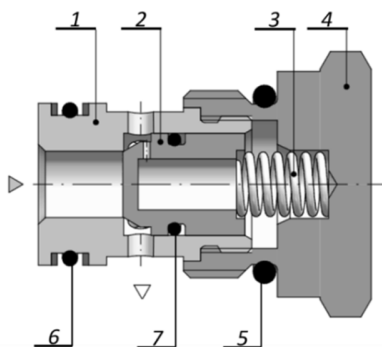
Zawór przelewowy służy w układzie hydraulicznym do ustawiania ciśnienia roboczego i zabezpiecza układ przed nadmiernym wzrostem ciśnienia umożliwiając przepływ cieczy roboczej do linii zlewowej. Przykładowy zawór przelewowy bezpośredniego działania przedstawiono na rysunku 20.



Rys. 20. Zawór przelewowy bezpośredniego działania, 1 – korpus, 2 – grzybek, 3 – układ regulacji otwarcia zaworu, 4 – sprężyna, 5 – element tłumiący, 6,7 – pierścienie uszczelniające (źródło: (Ponar Wadowice SA))

7. Zawór zwrotny

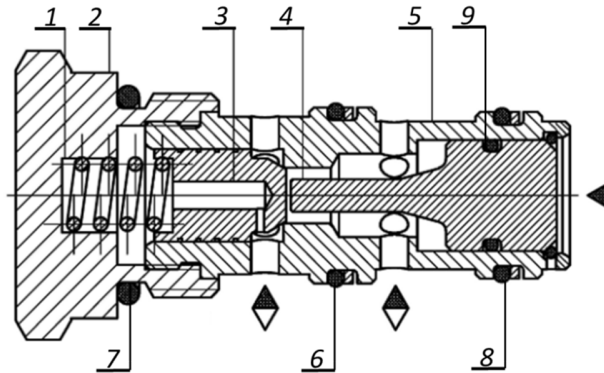
Zawór zwrotny w zabudowie nabojewej został przedstawiony na rysunku 21. Zadaniem zaworu jest zapewnienie przepływu cieczy roboczej tylko w jednym kierunku.



Rys. 21. Zawór zwrotny, 1 – tuleja, 2 – stożkowy element zamykający, 3 – sprężyna, 4 – gniazdo sprężyny, 5,6,7 – pierścienie uszczelniające (źródło: (Ponar Wadowice SA))

8. Zawór zwrotny sterowany.

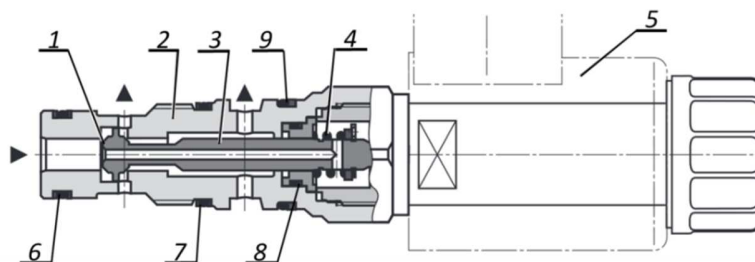
Odmianą zaworu zwrotnego, który może otwierać drogę przepływu, która normalnie jest zamknięta poprzez podanie do tłoczka sterującego sygnału w postaci ciśnienia ciecży. Przepływ ciecży w normalny kierunek jest zapewniany w taki sam sposób jak w przypadku zwykłego zaworu zwrotnego.



Rys. 22. Zawór zwrotny sterowany, 1 – sprężyna, 2 – gniazdo sprężyny, 3 – element stożkowy, 4 – tłoczek, 5 – tuleja, 6,7,8,9 – pierścienie uszczelniające (źródło: (Ponar Wadowice SA))

9. Rozdzielacz gniazdowy trójdrogowy.

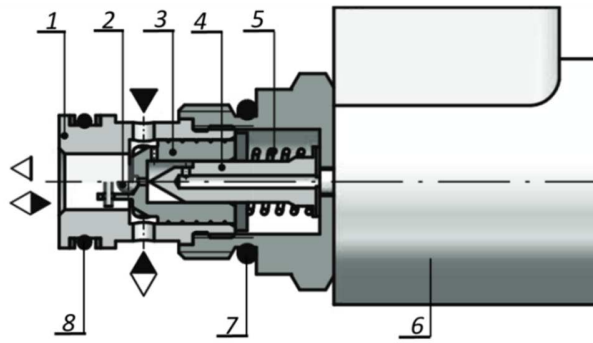
Rozdzielacz gniazdowy jest wykorzystywany tak jak każdy zawór tego typu do zmiany kierunku przepływu. W analizowanym układzie służy do doprowadzenia ciecży pod ciśnieniem do zaworów zwrotnych sterowanych.



Rys. 23. Rozdzielacz gniazdowy trójdrogowy dwupołożeniowy, 1 – gniazdo zaworu, 2 – tuleja, 3 – element zamykający, 4 – sprężyna, 5 – elektromagnes, 6,7,8,9 – pierścienie uszczelniające (źródło: (Rexroth))

10. Rozdzielacz gniazdowy dwudrogowy.

Rozdzielacz przedstawiony na rysunku 24 służy do sterowania kierunkiem przepływu ciecży roboczej. W przedstawionym zastosowaniu jest wykorzystywany do otwierania lub zamykania określonej drogi przepływu ciecży roboczej.



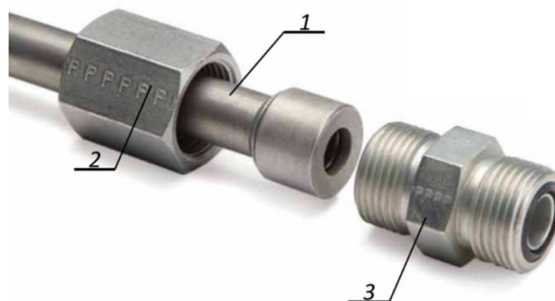
Rys. 24. Rozdzielacz gniazdowy dwudrogowy, 1 – tuleja, 2 – kulka, 3 – tłoczek, 4 – el. stożkowy, 5 – sprężyna, 6 – elektromagnes, 7,8 – pierścienie uszczelniające (źródło: (Ponar Wadowice SA))

11. Przewody hydrauliczne

Przewody hydrauliczne służą do łączenia elementów hydraulicznych umożliwiając dostarczanie energii ciśnienia cieczy do odbiorników. Stosowane są przewody elastyczne (rys. 25) oraz przewody sztywne (rys. 26) wraz z odpowiednimi końcówkami. Przewody są w sposób trwały łączone z końcówkami poprzez zakuwanie lub odpowiednie przygotowanie zakończeń.



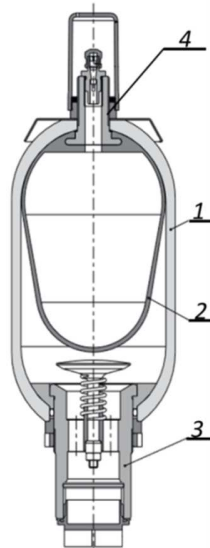
Rys. 25. Przewód elastyczny z zakutą końcówką, 1 – przewód elastyczny, 2 – końcówka przewodu, 3 – tuleja zaciskowa (źródło: (Hydron))



Rys. 26. Przewód sztywny, 1 – przewód sztywny z przygotowanym zakończeniem, 2 – nakrętka, 3 - złączka (źródło: (Parker))

12. Akumulator hydrauliczny

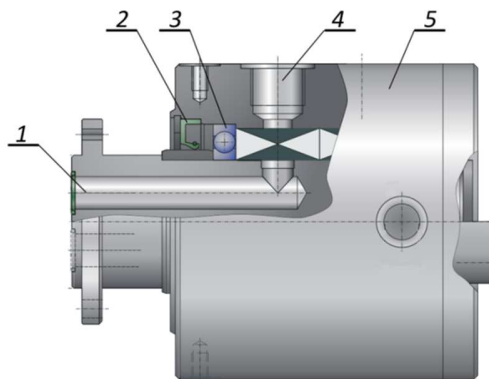
Akumulator hydrauliczny służy jako zapasowe źródło energii w układzie w przypadku awaryjnego hamowania turbiny. Występujący w akumulatorze pęcherz (rys. 27) napełniony jest azotem i zmniejsza swoją objętość podczas ładowania akumulatora.



Rys. 27. Akumulator pęcherzowy, 1 – cylinder, 2 – pęcherz, 3 – zawór olejowy, 4 – zawór gazowy (źródło: (Rexroth))

13. Złącze obrotowe.

Część układu hydraulicznego znajduje się w gondoli a część w piaście, która obraca się podczas pracy turbiny wiatrowej. W celu połączenia obu części układu stosuje się złącza obrotowe takie jak przedstawiono na rysunku 28.

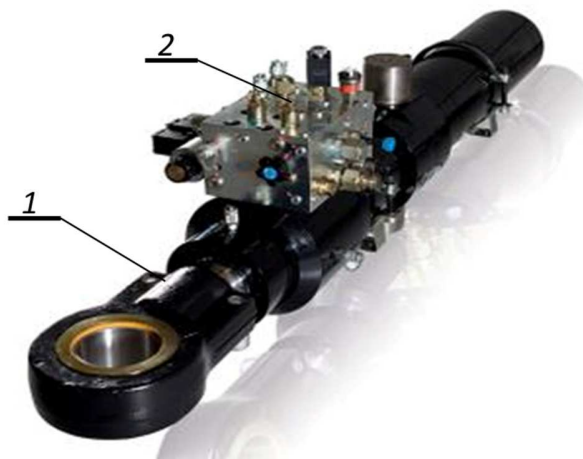


Rys. 28. Złącze obrotowe, 1 – element ruchomy z przyłączami hydraulicznymi, 2 – pakiet uszczelnień, 3 – łożysko, 4 – przyłącze hydrauliczne w części nieruchomej, 5 – element nieruchomy (źródło: (GAT - Gesellschaft für Antriebstechnik mgH, 2017))

14. Olej hydrauliczny

W analizie układu hydraulicznego uwzględniono również nośnik energii, którym jest olej hydrauliczny o typowych właściwościach fizyko-chemicznych.

W celu uproszczenia układu hydraulicznego stosowane są rozwiązania, w którym zawory w wersji nabojowej umieszczone są w jednym bloku. Zintegrowany układ do regulacji kąta natarcia turbiny wiatrowej został przedstawiony na rysunku 29.



Rys. 29. Zintegrowany układ hydrauliczny wykorzystywany do regulacji kąta natarcia łopaty turbiny wiatrowej, 1 – silownik hydrauliczny, 2 – blok zaworów (źródło: (Hydratech Dellner))

5.2 Zmodyfikowana analiza FMEA

5.2.1 Typowe wady elementów układów hydraulicznych

W pierwszym etapie zmodyfikowanej analizy FMEA przeprowadzono analizę typowych wad, które mogą powstawać w elementach układów hydraulicznych. Mechanizm powstawania wad w systemach mechaniczno-hydraulicznych jest złożonym zagadnieniem, chociaż wszystkie typowe wady, które występują w elementach układów hydraulicznych są charakterystyczne dla urządzeń mechanicznych takich jak przekładnie zębate, wały, łożyska toczne i ślizgowe oraz pompy. Niezależnie od znajomości rodzaju wad, przyczyna ich powstawania może nie być jednoznaczna. W pracy (Bloch i inni, 1999) przedstawiono wiele przykładów, w których przyczyny powstawania wad często są niejednoznaczne i wymagają prowadzenia pomocniczych badań i analiz. Dodatkowo, jedna wada może być zalążkiem kolejnej, która będzie wadą krytyczną np.: kawitacja lub erozja może zapoczątkować pęknięcia zmęczeniowe. Wady mogą zostać sklasyfikowane na kilka różnych sposobów, które są przedstawione np. w pracach (Stachowiak, 2005) (Kato, 2002). Według klasyfikacji przedstawionej w pracy (Donald i inni, 2013) wady można podzielić na cztery podstawowe kategorie:

1. Wady zmieniające pierwotne cechy fizyczne wynikające z ubytku materiału lub naruszeniu ciągłości struktury elementu (pęknięcia, odłamania, wyłamania) lub/i odkształcenia trwałe.

Tabela 15. Przykłady wad zmieniających cechy fizyczne elementów

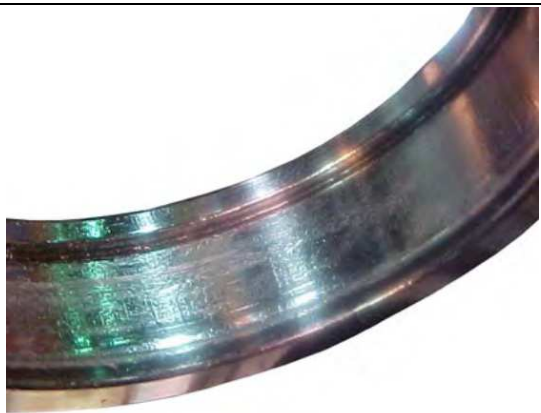

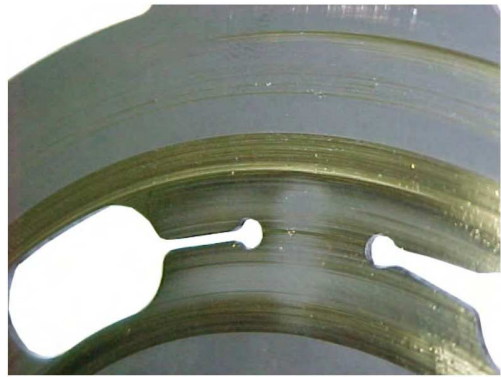

	
<p>Pęknięcie pokrywy pompy zębatej na skutek nagłego wzrostu ciśnienia (źródło: (Danfoss A/S, 2014))</p>	<p>Ukręcenie wałka na skutek ponadnormatywnych obciążeń: momentu skręcającego (źródło: (Parker Hannifin Manufacturing SAS, 2013))</p>
	
<p>Wyłamanie wieńca pompy łopatkowej (źródło: (Danfoss A/S, 2014))</p>	<p>Wyłamanie zęba pompy zębatej na skutek dostania się do pompy zanieczyszczeń (źródło: (Danfoss A/S, 2014))</p>
	
<p>Odształcenie wałka z wielowypustem (źródło: (Parker Hannifin Manufacturing SAS, 2013))</p>	<p>Trwałe odształcenie tłoczyska (źródło: (Rhkhydraulics))</p>

Tabela 16. Przykłady wad zmieniających cechy fizyczne elementów

	
<p>Rozerwanie ucha tłoczyska na skutek ponadnormatywnych obciążeń (źródło: (Rhhkhydraulics))</p>	<p>Zniszczenie pierścienia uszczelniającego na skutek gwałtownego odgazowywania zawartego w oleju powietrza (źródło: (Systemseals, 2014))</p>
	
<p>Pęknięcia pierścienia uszczelniającego na skutek wysokiej temperatury (źródło: (Systemseals, 2014))</p>	<p>Zdeformowany zgarniacz na skutek agresywnego oddziaływania oleju (źródło: (Systemseals, 2014))</p>

2. Zużycie, które można zdefiniować jako zmiana masy, struktury i własności fizycznych warstwy wierzchniej (Tabor i inni, 1980). Zmiany struktury wierzchniej mogą się odbywać na skutek wzajemnego oddziaływania elementów. Zużycie możemy sklasyfikować jako:
- zużycie ściernie,
 - zużycie adhezyjne
 - zużycie zmęczeniowe: pitting
 - fretting

Tabela 17. Przykłady zużycia elementów hydraulicznych.

	
<p>Przykład Pitting, bieżni łożyska (źródło: (Danfoss A/S, 2014))</p>	<p>Przykład zużycia ściernego: element pompy tłoczkowej (źródło: (Danfoss A/S, 2014))</p>
	
<p>Zużycie adhezyjne płyty pompy tłoczkowej (źródło: (Danfoss A/S, 2014))</p>	<p>Przykład korozji frettingowej wałka pompy (źródło: (Danfoss A/S, 2014))</p>

3. Erozja, którą można rozumieć jako ubytek masy na skutek oddziaływania czynników zewnętrznych. Do tego rodzaju wad można zaliczyć erozję kawitacyjną, która powstaje podczas przepływu cieczy i występowanie zjawiska kawitacji, czyli gwałtownego spadku ciśnienia w cieczy powodującego wyrywanie fragmentów w ścianach otaczających przepływ cieczy.

Tabela 18. Przykłady erozji elementów hydraulicznych.

	
<p>Erozja kawitacyjna pompy łopatkowej (źródło: (Parker Hannifin Manufacturing SAS, 2013))</p>	<p>Przykład erozji w pompie wywołanej zanieczyszczeniami oleju (źródło: (Danfoss A/S, 2014))</p>

4. Korozja/reakcje chemiczne

Korozję można zdefiniować jako oddziaływanie pomiędzy metalami a otaczającym je środowiskiem, w wyniku którego następuje uszkodzenie zmniejszenie własności materiału (Dobrzański, 2014). Ze względu na mechanizm uszkodzenia korozję można podzielić na chemiczną i elektrochemiczną. W przypadku elementów układów hydraulicznych korozji mogą towarzyszyć inne zjawiska takie jak kawitacja czy erozja.

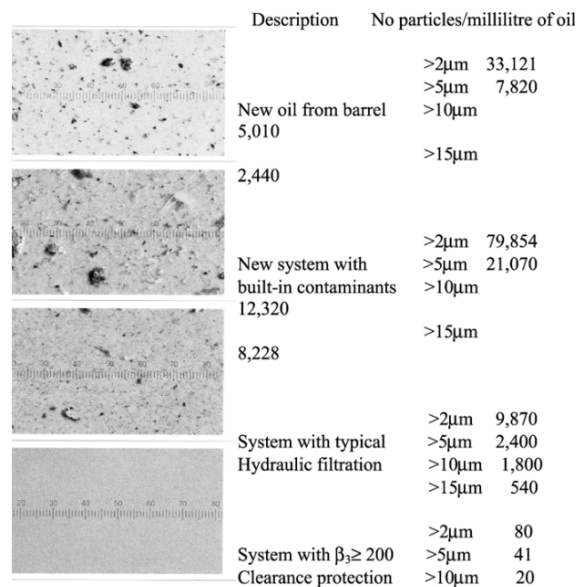
Tabela 19. Przykłady korozji elementów hydraulicznych.

	
<p>Korozja tłoczyśka siłownika (źródło: (Taizhou Chuanhu Hydraulic Machinery Co., Ltd.))</p>	<p>Korozja chemiczna łopatek pompy łopatkowej (źródło: (Parker Hannifin Manufacturing SAS, 2013))</p>
	
<p>Uszkodzenie pierścienia uszczelniającego na skutek agresywnego oddziaływania oleju (źródło: (Flitney, 2014))</p>	

W napędach hydraulicznych do zamiany energii ciśnienia na energię mechaniczną jest wykorzystywany przede wszystkim olej, którego własności mogą również wpływać na pracę całego układu. Jak każdy element układu jego funkcje również mogą ulegać degradacji na skutek wad, których nie można sklasyfikować w sposób podobny do przedstawionego powyżej. Typowe wady oleju hydraulicznego to zanieczyszczenia w postaci cząstek ciał stałych, obecność rozpuszczonego powietrza oraz wody. Można wyróżnić dwa główne źródła wymienionych zanieczyszczeń (Ng i inni, 2017), (Donaldson Filtration Solution, 2012), (Europe, 2011), (Parker Hannifin Corporation, 2014):

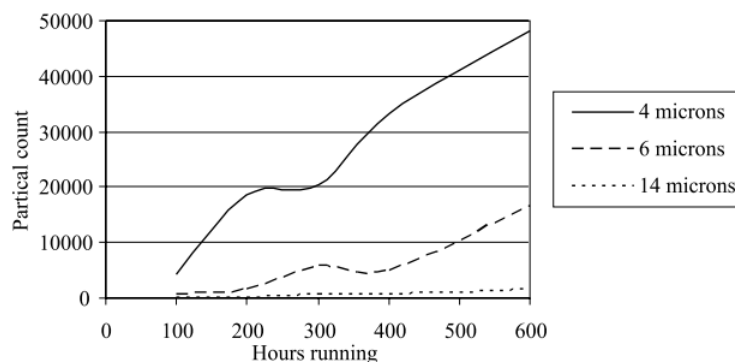
- a) Zewnętrzne, powstałe w wyniku przechowywania oleju, napraw układów hydraulicznych, testowania układów oraz wnikania zanieczyszczeń na skutek nieszczelności układu. Są one odpowiedzialne przede wszystkim za zanieczyszczenia wodą, powietrzem i niewielkim stopniu cząstkami stałymi.
- b) Wewnętrzne, które powstają na skutek normalnej pracy układu i są to przede wszystkim cząstki stałe będące skutkiem naturalnego zużycia elementów układu hydraulicznego (przede wszystkim pomp) oraz fragmenty uszczelnień.

Przykład zanieczyszczeń oleju cząstkami stałymi pochodzącymi zarówno ze źródeł zewnętrznych jak i wewnętrznych przedstawiono na rys. 30.



Rys. 30. Zanieczyszczenia oleju cząstkami stałymi (źródło: (Watton, 2007))

W przypadku źródeł wewnętrznych ilość generowanych zanieczyszczeń cząstkami stałymi nie jest stała a rośnie wraz ze wzrostem czasu pracy układu.



Rys. 31. Wzrost zanieczyszczeń cząstkami stałymi podczas pracy układu (źródło: (Watton, 2007))

Analiza przedstawionych powyżej wad elementów układu hydraulicznego prowadzi również do wniosku, że tego samego rodzaju wady mogą powodować różne ograniczenia realizacji funkcji systemu w zależności od stopnia zaawansowania procesów powstawania wady. W przypadku

zużycia, erozji i korozji jako również poziomu zanieczyszczenia oleju stopień zaawansowania wady wpływa na poziom degradacji funkcji systemu i może mieścić się zarówno w kategoriach wad degradujących funkcje systemu w sposób znaczący, średni jak i niewielki. Ponadto w początkowych stadiach powstawania wad mogą one nie wpływać na realizowane funkcje układu. Biorąc pod uwagę funkcje realizowane przez system, wymienione wady można sklasyfikować następująco:

- a) Wady krytyczne, kategoria W4: pęknięcie, odkształcenia plastyczne, złamanie, wyłamanie, zatarcie, ekstremalne zanieczyszczenie (dla oleju).
- b) Wady degradujące funkcje systemu w stopniu znacznym, kategoria W3: zużycie, erozja i korozja w znacznym stopniu, duże zanieczyszczenia oleju.
- c) Wady degradujące funkcje systemu w niewielkim stopniu, kategoria W2: zużycie, erozja i korozja w początkowym stadium, niewielkie zanieczyszczenia oleju.
- d) Wady niewpływające na funkcje systemu, kategoria W1: wady poza wymienionymi powyżej.

5.2.2 Analiza siłownika hydraulicznego

1. Etap przygotowawczy

W etapie przygotowawczym określono funkcję siłownika oraz dokonano klasyfikacji wad elementów siłownika według schematu przedstawionego poniżej.

Podstawowa funkcja: zamiana energii ciśnienia na energię mechaniczną w ruchu posuwistozwrotnym.

Dodatkowe wymagania: dopuszczalne przecieki zewnętrzne, większe niż normatywne, określane według określonych wymagań (ISO, 2020).

Klasyfikacja wad: Potencjalne wady zostały podzielone na kategorię zgodnie z przyjętą metodyką przedstawioną w poprzednim rozdziale.

Klasyfikacja elementów siłownika: Wszystkie elementy siłownika zostały przypisane do kategorii elementów krytycznych E4. Wymienione poniżej zostały uwzględnione w analizie FMEA:

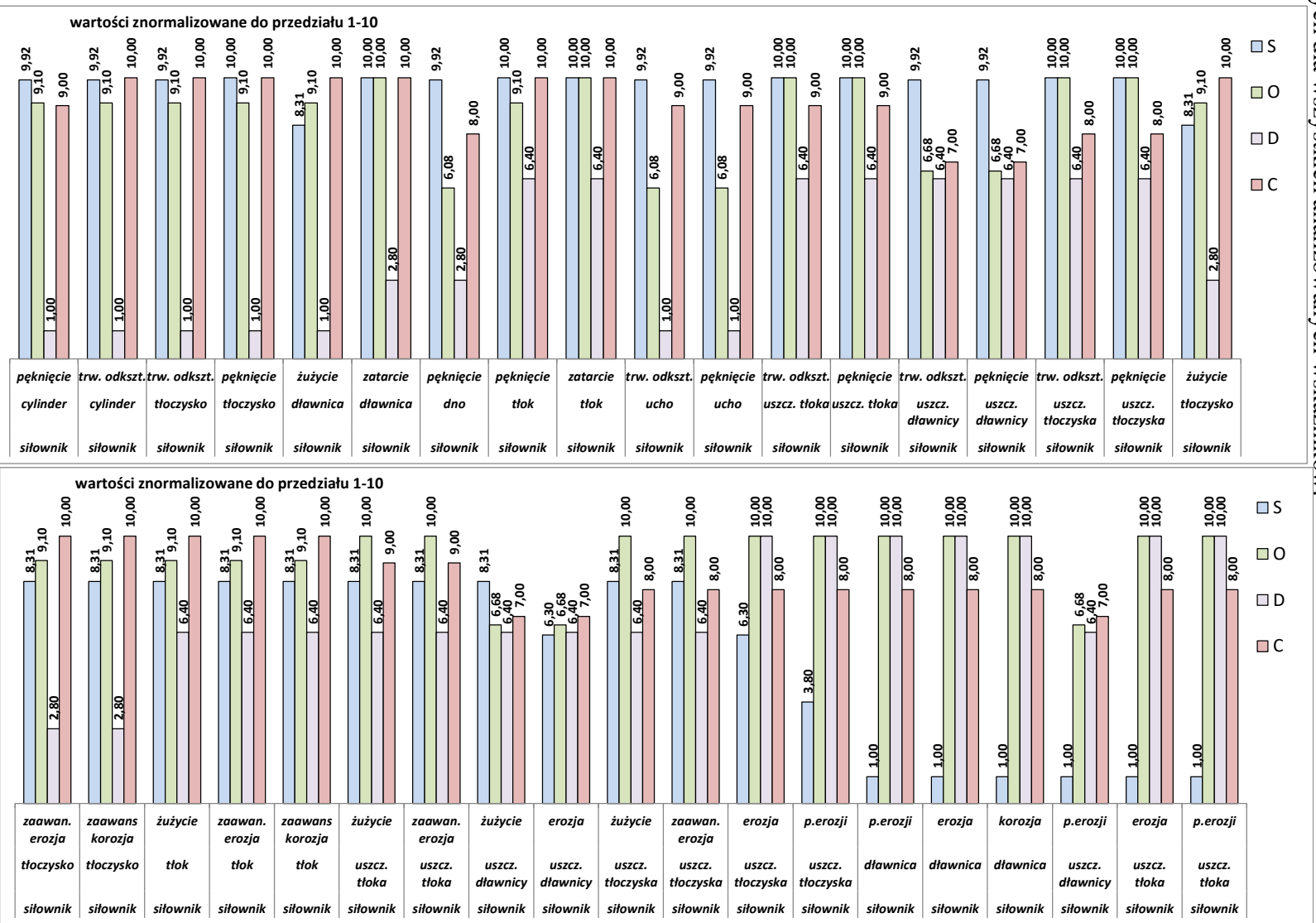
1. cylinder,
2. tłok,
3. tłoczysko,
4. dławnica,
5. ucho,
6. dno cylindra,
7. uszczelnienie tłoka,
8. uszczelnienie tłoczyska,
9. uszczelnienie dławnicy.

2. Analiza FMEA

Analizę FMEA przeprowadzono zgodnie z opracowaną metodyką określając dla każdego elementu siłownika wady, które potencjalnie mogą wystąpić wraz z odpowiednimi

współczynnikami. Zestawienie poszczególnych wad oraz wszystkie wartości współczynników przedstawiono w tabeli 20. Zgodnie z opracowaną metodyką, wyniki analizy FMEA przeprowadzono podział wyników na trzy kategorie. Pierwsza zawiera potencjalne wady, które występując uniemożliwiają realizowanie głównej funkcji siłownika: wykonywanie ruchu posuwisto-zwrotnego. Wyniki zostały przedstawiono w dalszej części tego rozdziału. Zawierają one wskaźniki FMEA, dla których wskaźnik znaczenia potencjalnej wady jest większy lub równy granicznej wartości, przy której podstawowa funkcja siłownika nie jest realizowana. Dla analizowanego siłownika wartość krytyczna wskaźnika znaczenia wady $S=9$. Druga kategoria wyników obejmuje te wady, dla których wskaźniki szacowanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady O , możliwości wykrycia wady D oraz kosztów C osiągają krytyczne wartości, dla których użytkowanie siłownika nie jest uzasadnione. Dla analizowanego siłownika wartości zostały arbitralnie określone następująco: $O=8$, $D=9$, $C=8$.

Wyniki przeprowadzonej analizy FMEA zostały przedstawione w postaci graficznej na wykresach słupkowych dla wszystkich analizowanych wskaźników.



Rys. 32. Wskaźniki analizy FMEA dla siłownika (źródło: opracowanie własne)

Tabela 21. Zestawienie wad, które uniemożliwiają realizację podstawowej funkcji siłownika (źródło: opracowanie własne)

Realizacja funkcji							
wartość graniczna S=9				S	O	D	C
1	siłownik	dławnica	zatarcie	10,00	10,00	2,80	10,00
2	siłownik	tłoczysko	pęknięcie	10,00	9,10	1,00	10,00
3	siłownik	tłok	pęknięcie	10,00	9,10	6,40	10,00
4	siłownik	tłok	zatarcie	10,00	10,00	6,40	10,00
5	siłownik	uszcz. tłoka	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	9,00
6	siłownik	uszcz. tłoka	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	9,00
8	siłownik	uszcz. tłoczyska	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	8,00
9	siłownik	uszcz. tłoczyska	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	8,00
10	siłownik	dno	pęknięcie	9,92	6,08	2,80	8,00
11	siłownik	cylinder	pęknięcie	9,92	9,10	1,00	9,00
12	siłownik	cylinder	trw. odksz.	9,92	9,10	1,00	10,00
13	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,92	9,10	1,00	10,00
14	siłownik	ucho	trw. odksz.	9,92	6,08	1,00	9,00
15	siłownik	ucho	pęknięcie	9,92	6,08	1,00	9,00
16	siłownik	uszcz. dławnicy	trw. odksz.	9,92	6,68	6,40	7,00
17	siłownik	uszcz. dławnicy	pęknięcie	9,92	6,68	6,40	7,00

Tabela 22. Zestawienie wskaźników FMEA, dla których użytkowanie siłownika nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników (źródło: opracowanie własne)

TOPSIS							
wartości graniczne: O=9, D=8, C=9				S	O	D	C
1	siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	6,30	10,00	10,00	8,00
2	siłownik	uszcz. tłoczyska	p.erozji	3,80	10,00	10,00	8,00
3	siłownik	tłok	zatarcie	10,00	10,00	6,40	10,00
4	siłownik	uszcz. tłoka	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	9,00
5	siłownik	uszcz. tłoka	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	9,00
6	siłownik	uszcz. tłoka	zużycie	8,31	10,00	6,40	9,00
7	siłownik	uszcz. tłoka	zaawan. erozja	8,31	10,00	6,40	9,00
8	siłownik	tłok	pęknięcie	10,00	9,10	6,40	10,00
9	siłownik	tłok	zużycie	8,31	9,10	6,40	10,00
10	siłownik	tłok	zaawan. erozja	8,31	9,10	6,40	10,00
11	siłownik	tłok	zaawans korozja	8,31	9,10	6,40	10,00
12	siłownik	uszcz. tłoczyska	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	8,00
13	siłownik	uszcz. tłoczyska	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	8,00
14	siłownik	uszcz. tłoczyska	zużycie	8,31	10,00	6,40	8,00
15	siłownik	uszcz. tłoczyska	zaawan. erozja	8,31	10,00	6,40	8,00
16	siłownik	dławnica	zatarcie	10,00	10,00	2,80	10,00
17	siłownik	tłoczysko	zużycie	8,31	9,10	2,80	10,00
18	siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	8,31	9,10	2,80	10,00
19	siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	8,31	9,10	2,80	10,00
20	siłownik	dławnica	zużycie	8,31	9,10	1,00	10,00
21	siłownik	tłoczysko	pęknięcie	10,00	9,10	1,00	10,00
22	siłownik	cylinder	trw. odksz.	9,92	9,10	1,00	10,00
23	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,92	9,10	1,00	10,00
24	siłownik	cylinder	pęknięcie	9,92	9,10	1,00	9,00
25	siłownik	ucho	trw. odksz.	9,92	6,08	1,00	9,00
26	siłownik	ucho	pęknięcie	9,92	6,08	1,00	9,00

Tabela 23. Zestawienie wskaźników FMEA, dla których użytkowanie siłownika nie jest uzasadnione. Ranking na podstawie miary odległości Euklidesowej (źródło: opracowanie własne)

ODL. EUKLIDESOWA							
wartości graniczne: O=9, D=8, C=9			S	O	D	C	
1	siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	6,30	10,00	10,00	8,00
2	siłownik	uszcz. tłoczyska	p.erozji	3,80	10,00	10,00	8,00
3	siłownik	tłok	zatarcie	10,00	10,00	6,40	10,00
4	siłownik	tłok	pęknięcie	10,00	9,10	6,40	10,00
5	siłownik	tłok	zużycie	8,31	9,10	6,40	10,00
6	siłownik	tłok	zaawan. erozja	8,31	9,10	6,40	10,00
7	siłownik	tłok	zaawans korozja	8,31	9,10	6,40	10,00
8	siłownik	uszcz. tłoka	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	9,00
9	siłownik	uszcz. tłoka	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	9,00
10	siłownik	uszcz. tłoka	zużycie	8,31	10,00	6,40	9,00
11	siłownik	uszcz. tłoka	zaawan. erozja	8,31	10,00	6,40	9,00
12	siłownik	uszcz. tłoczyska	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	8,00
13	siłownik	uszcz. tłoczyska	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	8,00
14	siłownik	uszcz. tłoczyska	zużycie	8,31	10,00	6,40	8,00
15	siłownik	uszcz. tłoczyska	zaawan. erozja	8,31	10,00	6,40	8,00
16	siłownik	dławnica	zatarcie	10,00	10,00	2,80	10,00
17	siłownik	tłoczysko	zużycie	8,31	9,10	2,80	10,00
18	siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	8,31	9,10	2,80	10,00
19	siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	8,31	9,10	2,80	10,00
20	siłownik	dławnica	zużycie	8,31	9,10	1,00	10,00
21	siłownik	tłoczysko	pęknięcie	10,00	9,10	1,00	10,00
22	siłownik	cylinder	trw. odksz.	9,92	9,10	1,00	10,00
23	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,92	9,10	1,00	10,00
24	siłownik	cylinder	pęknięcie	9,92	9,10	1,00	9,00
25	siłownik	ucho	trw. odksz.	9,92	6,08	1,00	9,00
26	siłownik	ucho	pęknięcie	9,92	6,08	1,00	9,00

Przedstawione zestawienia wskaźnika znaczenia wady S określają wady, których pojawienie się uniemożliwia zamianę energii ciśnienia na energię mechaniczną ruchu posuwisto-zwrotnego na skutek uszkodzeń mechanicznych elementów lub całkowitej utraty szczelności siłownika. Wady, które degradują funkcję siłownika to przede wszystkim wady związane ze zużyciem, erozją i korozją tłoka, tłoczyska oraz uszczelnień. Stopień degradacji funkcji siłownika zależy od stopnia zaawansowania zużycia elementów siłownika.

W celu sprawdzenia poprawności opracowanej metody zmodyfikowano założenia, dla których określono dodatkowe warunki, wynikające z zastosowania siłownika w układzie nastawy kąta natarcia łopat turbiny wiatrowej. Funkcja siłownika oraz dodatkowe wymagania będą wyglądały jak przedstawiono poniżej.

Podstawowa funkcja: zamiana energii ciśnienia na energię mechaniczną w ruchu posuwisto-zwrotnym.

Dodatkowe wymagania: brak przecieków zewnętrznych.

Klasyfikacja wad:

- a) Wady klasy W4, zostały przyjęte podobnie jak w przypadku poprzedniej analizy oraz dodatkowo uwzględniono wady, których pojawienie się dla wybranych części może spowodować przecieki zewnętrzne. Czyli wady typu erozja, korozja oraz zużycie pojawiające

się w dławnicy, tłoczysku są traktowane jako krytyczne. Podobnie z wszelakimi wadami uszczelnień, które mogą powodować przecieki zewnętrzne.

- b) Wady klasy W3, to wady degradujące funkcję zamiany energii ciśnienia w energię mechaniczną w sposób znaczny. Do tych wad możemy zaliczyć wady tłoka oraz uszczelnień tłoka.
- c) Wady klasy W2, to wady degradujące funkcję zamiany energii ciśnienia w energię mechaniczną w niewielkim stopniu. Do tych wad możemy zaliczyć wady tłoka oraz uszczelnień tłoka.
- d) Wady klasy W1, to wady, które pojawiając się nie degradują funkcji systemu. Do tych wad możemy zaliczyć nawet wady, rozumiane jako krytyczne, ale w początkowym stadium ich rozwoju, które mogą rozwinąć się do postaci, w której wada może być traktowana jako krytyczna.

Po przeprowadzonej analizie wyniki przedstawiono zestawienie wad dla nowo zdefiniowanej funkcji systemu.

Tabela 24. Zestawienie wad, które uniemożliwiają realizację podstawowej funkcji siłownika z ograniczeniem: brak przecieków zewnętrznych (źródło: opracowanie własne)

Realizacja funkcji							
wartość graniczna S=9				S	O	D	C
1	siłownik	dławnica	zatarcie	10,00	10,00	2,80	10,00
2	siłownik	tłoczysko	pęknięcie	10,00	9,10	1,00	10,00
3	siłownik	tłok	pęknięcie	10,00	9,10	6,40	10,00
4	siłownik	tłok	zatarcie	10,00	10,00	6,40	10,00
5	siłownik	uszcz. tłoka	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	9,00
6	siłownik	uszcz. tłoka	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	9,00
8	siłownik	uszcz. tłoczyska	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	8,00
9	siłownik	uszcz. tłoczyska	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	8,00
10	siłownik	tłoczysko	zużycie	10,00	9,10	2,80	10,00
11	siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	10,00	9,10	2,80	10,00
12	siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	10,00	9,10	2,80	10,00
13	siłownik	uszcz. dławnicy	zużycie	10,00	6,68	6,40	7,00
14	siłownik	uszcz. dławnicy	zużycie	10,00	6,68	6,40	7,00
15	siłownik	uszcz. dławnicy	erozja	10,00	6,68	6,40	7,00
16	siłownik	uszcz. tłoczyska	zużycie	10,00	10,00	6,40	8,00
17	siłownik	uszcz. tłoczyska	zaawan. erozja	10,00	10,00	6,40	8,00
18	siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	10,00	10,00	10,00	8,00
19	siłownik	dno	pęknięcie	9,92	6,08	2,80	8,00
20	siłownik	cylinder	pęknięcie	9,92	9,10	1,00	9,00
21	siłownik	cylinder	trw. odksz.	9,92	9,10	1,00	10,00
22	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,92	9,10	1,00	10,00
23	siłownik	ucho	trw. odksz.	9,92	6,08	1,00	9,00
24	siłownik	ucho	pęknięcie	9,92	6,08	1,00	9,00
25	siłownik	uszcz. dławnicy	trw. odksz.	9,92	6,68	6,40	7,00
26	siłownik	uszcz. dławnicy	pęknięcie	9,92	6,68	6,40	7,00

Opracowaną metodę zweryfikowano również poprzez zmianę jednego z elementów siłownika, że standardowego rozwiązania na unikalne, które wcześniej nie było sprawdzane. Zmiany dotyczyły tłoka oraz jego uszczelnienia. Wyniki analizy w postaci klasyfikacji potencjalnych wad, których wskaźniki szacowanego prawdopodobieństwa O, możliwości wykrycia wady D, oraz kosztów przedstawiono w tabeli 25.

Tabela 25. Zestawienie wskaźników FMEA, dla których użytkowanie siłownika nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników. Nowatorska konstrukcja tłoka oraz jego uszczelnienia (źródło: opracowanie własne)

TOPSIS							
wartości graniczne: O=9, D=8, C=9			S	O	D	C	
1	siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	6,30	10,00	10,00	8,00
2	siłownik	uszcz. tłoczyska	p.erozji	3,80	10,00	10,00	8,00
3	siłownik	uszcz. tłoka	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	9,00
4	siłownik	uszcz. tłoka	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	9,00
5	siłownik	uszcz. tłoka	żużycie	8,31	10,00	6,40	9,00
6	siłownik	uszcz. tłoka	zaawan. erozja	8,31	10,00	6,40	9,00
7	siłownik	uszcz. tłoczyska	trw. odksz.	10,00	10,00	6,40	8,00
8	siłownik	uszcz. tłoczyska	pęknięcie	10,00	10,00	6,40	8,00
9	siłownik	uszcz. tłoczyska	żużycie	8,31	10,00	6,40	8,00
10	siłownik	uszcz. tłoczyska	zaawan. erozja	8,31	10,00	6,40	8,00
11	siłownik	tłok	zatarcie	10,00	3,80	6,40	10,00
12	siłownik	tłok	pęknięcie	10,00	3,52	6,40	10,00
13	siłownik	tłok	żużycie	8,31	3,52	6,40	10,00
14	siłownik	tłok	zaawan. erozja	8,31	3,52	6,40	10,00
15	siłownik	tłok	zaawans korozja	8,31	3,52	6,40	10,00
16	siłownik	dławnica	zatarcie	10,00	3,80	2,80	10,00
17	siłownik	tłoczysko	żużycie	8,31	3,52	2,80	10,00
18	siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	8,31	3,52	2,80	10,00
19	siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	8,31	3,52	2,80	10,00
20	siłownik	dławnica	żużycie	8,31	3,52	1,00	10,00
21	siłownik	tłoczysko	pęknięcie	10,00	3,52	1,00	10,00
22	siłownik	cylinder	trw. odksz.	9,92	3,52	1,00	10,00
23	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,92	3,52	1,00	10,00
24	siłownik	cylinder	pęknięcie	9,92	3,52	1,00	9,00
25	siłownik	ucho	trw. odksz.	9,92	2,58	1,00	9,00
26	siłownik	ucho	pęknięcie	9,92	2,58	1,00	9,00

5.2.3 Analiza układu hydraulicznego

Opracowana metoda analizy FMEA została wykorzystana do analizy układu hydraulicznego do nastawiania kąta natarcia łopat turbiny wiatrowej, który został przedstawiony w rozdziale 5.1.1. Do analizy wykorzystano przedstawione w wymienionym rozdziale elementy wraz z ich opisem. Analiza została przeprowadzona każdej z realizowanych funkcji osobno: nastawianie kąta natarcia łopat, awaryjne hamowanie turbiny oraz praca układu na biegu jałowym. Podobnie jak w przypadku analizy siłownika zdefiniowano odpowiednie założenia przedstawione poniżej.

1. Etap przygotowawczy

W etapie przygotowawczym określono funkcję siłownika oraz dokonano klasyfikacji wad i elementów układu według schematu przedstawionego poniżej.

Podstawowa funkcja: nastawa kąta natarcia łopat turbiny wiatrowej, awaryjne hamowanie.

Funkcja pomocnicza: praca na biegu jałowym.

Dodatkowe wymagania: brak przecieków zewnętrznych.

Klasyfikacja wad: Potencjalne wady zostały podzielone na kategorię zgodnie z przedstawioną poniżej klasyfikacją:

- a) Wady krytyczne, kategoria W4: pęknięcie, odkształcenia plastyczne, złamanie, wyłamanie, zatarcie, ekstremalne zanieczyszczenie (dla oleju).
- b) Wady degradujące funkcje systemu w stopniu znacznym, kategoria W3: zużycie, erozja i korozja w znacznym stopniu, duże zanieczyszczenia oleju.
- c) Wady degradujące funkcje systemu w niewielkim stopniu, kategoria W2: zużycie, erozja i korozja w początkowym stadium, niewielkie zanieczyszczenia oleju.
- d) Wady niewpływające na funkcje systemu, kategoria W1: wady poza wymienionymi powyżej.

Dla uproszczenia i zawężenia zakresu analizy wykorzystano tylko wady, które mogą pojawić się podczas eksploatacji układu.

2. Klasyfikacja elementów układu:

Wymienione poniżej składniki układu zostały uwzględnione w analizie:

1. zbiornik,
2. pompa łopatkowa,
3. zawór przelewowy,
4. zawór zwrotny,
5. zawór zwrotny sterowany,
6. rozdzielacz suwakowy czterodrogowy trójpołożeniowy,
7. rozdzielacz gniazdowy dwudrogowy,
8. rozdzielacz gniazdowy trójdrogowy,
9. siłownik dwustronnego działania,
10. złącze obrotowe,
11. przewody sztywne,
12. przewody elastyczne,
13. filtr wysokociśnieniowy,
14. olej jako element konwersji energii.

Podobnie jak w przypadku siłownika hydraulicznego elementarnymi składnikami systemu są poszczególne części składników układu. Klasyfikacja użytych elementów jest przedstawiona w tabeli 26. Większość elementów została zaliczona do klasy E4 (elementy krytyczne), za wyjątkiem wkładu filtra wysokociśnieniowego (E2) oraz odpowietrzacza (E1).

3. Analiza FMEA

Analizę FMEA przeprowadzono zgodnie z opracowaną metodyką określając dla każdego elementu układu wady, które potencjalnie mogą wystąpić dla danej części elementu układu wraz z odpowiednimi współczynnikami.

Zestawienie poszczególnych wad oraz wszystkie wartości współczynników przedstawiono w tabelach i rysunkach przedstawionych w dalszej części pracy. Zgodnie z opracowaną metodyką, dokonano podziału wyników analizy FMEA na trzy kategorie. Pierwsza zawiera potencjalne wady, które występując uniemożliwiają realizowanie analizowanej funkcji systemu. Dla analizowanego układu wartość krytyczna wskaźnika znaczenia wady $S=9$. Druga kategoria wyników obejmuje te wady, dla których wskaźniki szacowanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady O , możliwości wykrycia wady D oraz kosztów C osiągają krytyczne wartości, dla których użytkowanie układu nie jest uzasadnione. Dla analizowanego układu wartości zostały określone podobnie jak dla siłownika: $O=8$, $D=9$, $C=8$. Wprowadzone dane do obliczenia wskaźników analizy FMEA zostały przedstawione w tabeli 26.

Klasyfikację wad, które uniemożliwiają realizowanie nastawy kąta natarcia łopat turbiny przedstawiono w tabeli 27. Najwyższą wartość znaczenia wady została uzyskana dla oleju, następnie elementów pompy, zaworów, siłownika i uszczelnień przewodów hydraulicznych.

Tabela 27. Zestawienie wad, dla których nastawianie kąta natarcia turbiny nie jest realizowane (źródło: opracowanie własne)

Realizacja funkcji: nastawa kąta natarcia							
wartość graniczna S=9			S	O	D	C	
1	el. transfer energii	olej	d.zanieczyszczenie	10,00	9,62	10,00	8,00
2	el. transfer energii	olej	zapowietrzenie	10,00	9,62	10,00	8,00
3	pompa	wałek	pęknięcie	9,31	5,46	2,80	7,00
4	pompa	tłoczki	zatarcie	9,31	10,00	6,40	10,00
5	pompa	uszcz. wałka	erozja	9,24	8,65	6,40	8,00
6	rozdzielacz 3/4	suwak	zatarcie	9,24	3,92	2,80	10,00
8	z.przelewowy	el. tłumiący	zatarcie	9,24	5,27	2,80	10,00
9	z.przelewowy	p.uszcz.zew.	zaawan. erozja	9,24	3,37	2,80	7,00
10	roz. gniazd. 3dr	tłoczek st.	zatarcie	9,24	4,60	2,80	10,00
11	roz. gniazd. 2 dr.	tłoczek st.	zatarcie	9,24	5,95	2,80	10,00
12	z.zwrotny ster.	tłoczek	zatarcie	9,18	5,95	2,80	10,00
13	z.zwrotny ster.	el. sterujący	zatarcie	9,18	5,17	2,80	8,00
14	siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	9,15	4,89	2,80	10,00
15	siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	9,15	4,89	2,80	10,00
16	siłownik	tłoczysko	zużycie	9,15	4,89	2,80	10,00
17	siłownik	tłoczysko	zatarcie	9,15	5,33	2,80	10,00
18	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,15	5,33	6,40	10,00
19	siłownik	uszcz. dławnicy	zużycie	9,15	3,73	6,40	7,00
20	siłownik	uszcz. dławnicy	erozja	9,15	3,73	6,40	7,00
21	siłownik	uszcz. tłoczyska	zużycie	9,15	5,33	6,40	8,00
22	siłownik	uszcz. tłoczyska	zaawan. erozja	9,15	5,33	6,40	8,00
23	siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	9,15	5,33	10,00	8,00
24	prz. sztywne	przewód szt.	pęknięcie	9,11	2,09	1,00	7,00
25	prz. elastyczne	przewód elas.	pęknięcie	9,11	2,47	1,00	7,00
26	prz. sztywne	uszczelka	pęknięcie	9,11	2,09	1,00	7,00
27	zł. obrotowe	uszczelnienia	zużycie	9,11	2,47	1,00	7,00
28	z.zwrotny ster.	p.uszcz.zew.	zaawan. erozja	9,11	3,77	2,80	7,00

Wady, których pojawienie się spowoduje, że użytkowanie systemu nie jest uzasadnione ze względu na wysokie wskaźniki przewidywanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady (O), możliwości wykrycia wady (D), czy też kosztów (C). Zestawienie tych wad przedstawiono w tabeli 28.

Tabela 28. Zestawienie wad, dla których użytkowanie układu nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników (źródło: opracowanie własne)

TOPSIS: nastawa kąta natarcia							
wartości graniczne: O=9, D=8, C=9							
			S	O	D	C	
1	pompa	tłoczki	zużycie	7,69	10,00	6,40	10,00
2	pompa	tłoczki	zaawan. erozja	7,75	10,00	6,40	10,00
3	pompa	tłoczki	zaawans korozja	7,75	10,00	6,40	10,00
4	pompa	tłoczki	zatarcie	9,31	10,00	6,40	10,00
5	pompa	bęben	zużycie	7,69	10,00	6,40	10,00
6	pompa	bęben	zaawan. erozja	7,69	10,00	6,40	10,00
7	siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	9,15	5,33	10,00	8,00
8	siłownik	dławnica	erozja	5,81	5,33	10,00	8,00
9	siłownik	dławnica	korozja	5,81	5,33	10,00	8,00
10	siłownik	uszcz. tłoka	erozja	5,81	5,33	10,00	8,00
11	siłownik	uszcz. tłoka	p.erozji	3,55	5,33	10,00	8,00
12	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,15	5,33	6,40	10,00
13	siłownik	uszcz. tłoka	zużycie	7,62	5,33	6,40	9,00
14	siłownik	uszcz. tłoka	zaawan. erozja	7,62	5,33	6,40	9,00
15	siłownik	tłok	zużycie	7,62	4,89	6,40	10,00
16	siłownik	tłok	zaawan. erozja	7,62	4,89	6,40	10,00
17	siłownik	tłok	zaawans korozja	7,62	4,89	6,40	10,00
18	siłownik	tłoczysko	zatarcie	9,15	5,33	2,80	10,00
19	siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	9,15	4,89	2,80	10,00
20	siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	9,15	4,89	2,80	10,00
21	siłownik	tłoczysko	zużycie	9,15	4,89	2,80	10,00
22	siłownik	dławnica	zużycie	7,62	4,89	1,00	10,00

W kolejnych krokach dokonano analizy FMEA dla dwóch pozostałych funkcji: awaryjnego hamowania turbiny oraz pracy na biegu jałowym. W obu przypadkach zastosowano taką samą metodykę jak dla funkcji nastawiania kąta natarcia łopat turbiny. Dane wykorzystane do analizy dla awaryjnego hamowania przedstawiono w tabeli 29. Wady, które uniemożliwiają realizowanie tej funkcji przedstawiono w tabeli 30. Natomiast tabela 31 przedstawia klasyfikację wad, których skutki powodują, że użytkowanie układu nie jest racjonalne ze względu na prawdopodobieństwo pojawienia się wady (O), możliwość wykrycia (D) czy też potencjalne koszty (C).

Tabela 30. Zestawienie wad, dla których awaryjne hamowanie nie jest realizowane (źródło: opracowanie własne)

Realizacja funkcji: awaryjne hamowanie							
wartość graniczna S=9			S	O	D	C	
1	siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	9,57	5,06	2,80	10,00
2	siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	9,57	5,06	2,80	10,00
3	siłownik	tłoczysko	żużycie	9,57	5,06	2,80	10,00
4	siłownik	tłoczysko	zatarcie	9,57	5,51	2,80	10,00
5	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,57	5,51	6,40	10,00
6	siłownik	uszcz. dławnicy	żużycie	9,57	3,85	6,40	7,00
7	siłownik	uszcz. dławnicy	erozja	9,57	3,85	6,40	7,00
8	siłownik	uszcz. tłoczyska	żużycie	9,57	5,51	6,40	8,00
9	siłownik	uszcz. tłoczyska	zaawan. erozja	9,57	5,51	6,40	8,00
10	siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	9,57	5,51	10,00	8,00
11	akumulator	przepona	pęknięcie	9,54	2,27	10,00	7,00
12	akumulator	przepona	żużycie	9,54	2,27	10,00	7,00
13	prz. sztywne	przewód szt.	pęknięcie	9,54	2,13	1,00	7,00
14	prz. elastyczne	przewód elas.	pęknięcie	9,54	2,54	1,00	7,00
15	prz. sztywne	uszczelka	pęknięcie	9,54	2,13	1,00	7,00
16	z.zwrotny ster.	tłoczek	zatarcie	9,61	6,16	2,80	10,00
17	z.zwrotny ster.	p.uszcz. zew.	zaawan. erozja	9,54	3,89	2,80	7,00

Tabela 31. Zestawienie wad, dla których użytkowanie układu nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników (źródło: opracowanie własne)

TOPSIS: awaryjne hamowanie							
wartości graniczne: O=9, D=8, C=9			S	O	D	C	
1	siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	9,57	5,51	10,00	8,00
2	siłownik	dławnica	erozja	6,06	5,51	10,00	8,00
3	siłownik	dławnica	korozja	6,06	5,51	10,00	8,00
4	siłownik	uszcz. tłoka	erozja	6,06	5,51	10,00	8,00
5	siłownik	uszcz. tłoka	p.erozji	3,68	5,51	10,00	8,00
6	siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	9,57	5,51	6,40	10,00
7	siłownik	uszcz. tłoka	żużycie	7,97	5,51	6,40	9,00
8	siłownik	uszcz. tłoka	zaawan. erozja	7,97	5,51	6,40	9,00
9	siłownik	tłok	żużycie	7,97	5,06	6,40	10,00
10	siłownik	tłok	zaawan. erozja	7,97	5,06	6,40	10,00
11	siłownik	tłok	zaawans korozja	7,97	5,06	6,40	10,00
12	akumulator	przepona	pęknięcie	9,54	2,27	10,00	7,00
13	akumulator	przepona	żużycie	9,54	2,27	10,00	7,00
14	z.zwrotny ster.	tłoczek	zatarcie	9,61	6,16	2,80	10,00
15	z.zwrotny ster.	tłoczek	zaawan. erozja	8,04	6,16	2,80	10,00
16	siłownik	tłoczysko	zatarcie	9,57	5,51	2,80	10,00
17	siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	9,57	5,06	2,80	10,00
18	siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	9,57	5,06	2,80	10,00
19	siłownik	tłoczysko	żużycie	9,57	5,06	2,80	10,00
20	siłownik	dławnica	żużycie	7,97	5,06	1,00	10,00

Analiza FMEA dla pomocniczej funkcji, którą jest praca układu na biegu jałowym została wykonana dla danych przedstawionych w tabeli 32. Natomiast zestawienie wad, które uniemożliwiają realizację analizowanej funkcji przedstawiono w tabeli 33. Podobnie jak w przypadku poprzednich analiz zestawienie obejmuje te wady, których skutki powodują, że użytkowanie systemu nie jest uzasadnione.

Tabela 33. Zestawienie wad, dla których praca układu na biegu jałowym nie jest realizowana (źródło: opracowanie własne)

Realizacja funkcji: bieg jałowy				S	O	D	C
wartość graniczna S=9							
1	el. transfer energii	olej	d.zanieczyszczenie	10,00	9,62	10,00	8,00
2	el. transfer energii	olej	zapowietrzenie	10,00	9,62	10,00	8,00
3	pompa	tłoczki	zatarcie	9,41	10,00	6,40	10,00
4	pompa	wałek	pęknięcie	9,41	5,46	2,80	7,00
5	pompa	uszcz. wałka	erozja	9,34	8,65	6,40	8,00
6	roz. gniazd. 2 dr.	tłoczek st.	zatarcie	9,34	5,95	2,80	10,00
8	z.przelewowy	el. tłumiący	zatarcie	9,34	5,27	2,80	10,00
9	z.przelewowy	p.uszcz. zew.	zaawan. erozja	9,34	3,37	2,80	7,00
10	prz. sztywne	przewód szt.	pęknięcie	9,21	2,09	1,00	7,00
11	prz. elastyczne	przewód elas.	pęknięcie	9,21	2,47	1,00	7,00
12	prz. sztywne	uszczelka	pęknięcie	9,21	2,09	1,00	7,00

Tabela 34. Zestawienie wad, dla których użytkowanie układu nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników (źródło: opracowanie własne)

TOPSIS: bieg jałowy				S	O	D	C
wartości graniczne: O=9, D=8, C=9							
1	el. transfer energii	olej	d.zanieczyszczenie	10,00	9,62	10,00	8,00
2	el. transfer energii	olej	zapowietrzenie	10,00	9,62	10,00	8,00
3	pompa	tłoczki	zaawans korozja	7,83	10,00	6,40	10,00
4	pompa	tłoczki	zatarcie	9,41	10,00	6,40	10,00
5	pompa	tłoczki	zaawan. erozja	7,83	10,00	6,40	10,00
6	pompa	tłoczki	zużycie	7,77	10,00	6,40	10,00
7	pompa	bęben	zużycie	7,77	10,00	6,40	10,00
8	pompa	bęben	zaawan. erozja	7,77	10,00	6,40	10,00
9	roz. gniazd. 2 dr.	tłoczek st.	zatarcie	9,34	5,95	2,80	10,00
10	roz. gniazd. 2 dr.	tłoczek st.	zaawan. erozja	7,77	5,95	2,80	10,00
11	z.zwrotny ster.	tłoczek	zatarcie	9,28	5,95	2,80	10,00
12	z.przelewowy	el. sterujący	zaawan. erozja	7,77	5,27	2,80	10,00
13	z.przelewowy	korpus	zaawan. erozja	7,77	5,27	2,80	10,00
14	z.przelewowy	el. tłumiący	zatarcie	9,34	5,27	2,80	10,00

Ze względu na realizację kilku funkcji przez analizowany system, sumaryczne znaczenie skutków wystąpienia wady zostało przedstawione w tabeli 35. Sumaryczną wartość znaczenia wady obliczono zgodnie z równaniem (9).

Tabela 35. Sumaryczna ocena znaczenia skutków wad dla układu (źródło: opracowanie własne)

Realizacja funkcji: suma funkcji			S	O	D	C
wartość graniczna S						
el. transfer energii	olej	d.zanieczyszczenie	23,33	22,83	23,33	18,67
el. transfer energii	olej	zapowietrzenie	23,33	22,83	23,33	18,67
prz. sztywne	przewód szt.	pęknięcie	21,40	4,92	2,33	16,33
prz. elastyczne	przewód elas.	pęknięcie	21,40	5,83	2,33	16,33
prz. sztywne	uszczelka	pęknięcie	21,40	4,92	2,33	16,33
z.przelewowy	p.uszcz. zew.	zaawan. erozja	18,92	7,07	5,93	14,33
roz. gniazd. 3dr	tłoczek st.	zatarcie	18,59	9,35	5,60	20,00
z.zwrotny ster.	tłoczek	zatarcie	18,46	12,11	5,60	20,00
z.zwrotny ster.	el. sterujący	zatarcie	18,46	10,53	5,60	16,00
siłownik	tłoczysko	zaawan. erozja	18,39	9,95	5,60	20,00
siłownik	tłoczysko	zaawans korozja	18,39	9,95	5,60	20,00
siłownik	tłoczysko	żużycie	18,39	9,95	5,60	20,00
siłownik	tłoczysko	zatarcie	18,39	10,84	5,60	20,00
siłownik	tłoczysko	trw. odksz.	18,39	10,84	12,80	20,00
siłownik	uszcz. dławnicy	żużycie	18,39	7,58	12,80	14,00
siłownik	uszcz. dławnicy	erozja	18,39	7,58	12,80	14,00
siłownik	uszcz. tłoczyska	żużycie	18,39	10,84	12,80	16,00
siłownik	uszcz. tłoczyska	zaawan. erozja	18,39	10,84	12,80	16,00
siłownik	uszcz. tłoczyska	erozja	18,39	10,84	20,00	16,00
z.zwrotny ster.	p.uszcz. zew.	zaawan. erozja	18,33	7,66	5,60	14,00
pompa	wałek	pęknięcie	12,44	7,27	3,73	9,33
pompa	tłoczki	zatarcie	12,44	13,33	8,53	13,33
pompa	uszcz. wałka	erozja	12,36	11,53	8,53	10,67
z.przelewowy	el. tłumiący	zatarcie	12,36	7,03	3,73	13,33
roz. gniazd. 2 dr.	tłoczek st.	zatarcie	12,36	7,93	3,73	13,33
rozdzielacz 3/4	suwak	zatarcie	9,24	3,92	2,80	10,00
akumulator	przepona	pęknięcie	9,21	2,27	10,00	7,00
akumulator	przepona	żużycie	9,21	2,27	10,00	7,00
zł. obrotowe	uszczelnienia	żużycie	9,11	2,47	1,00	7,00

5.3 Ocena wyników opracowanej analizy FMEA

5.3.1 Analiza siłownika hydraulicznego

Analiza siłownika hydraulicznego przedstawiona w rozdziale 5.2.2 została przygotowana przy założeniu, że wszystkie możliwe wady mogą się pojawić. Z założenia opracowana metodyka pozwala przewidywać prawdopodobieństwo wystąpienia potencjalnej wady, która może pojawić się podczas pracy systemu. W związku z tym, dla części potencjalnych wad, takich jak:

- a) pęknięcie tłoczyska $O=9.10$,
- b) trwałe odkształcenie tłoczyska $O=9.10$,
- c) pęknięcie cylindra $O=9.10$,

uzyskano bardzo wysokie wartości szacowanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady. To prowadzi do wniosku, że wady takie mogłyby się pojawić podczas normalnej eksploatacji systemu tylko w przypadku zastosowania niewłaściwych materiałów, błędnych obliczeń konstrukcyjnych lub wykorzystanie siłownika dla warunków pracy poza przyjętą specyfikacją. Sporadyczne wystąpienie wymienionych wad jest możliwe tylko w przypadku wystąpienia wad materiałowych lub dla warunków pracy poza zdefiniowaną specyfikacją. Przy założeniu, że zostaną wyeliminowane przyczyny konstrukcyjne i materiałowe, szacowane prawdopodobieństwo wystąpienia pozostałych wad zgadza się z powszechnie dostępnymi

opisami najczęściej występujących wad siłowników hydraulicznych. Wśród których należy wymienić przede wszystkim utratę szczelności na skutek uszkodzeń uszczelnień a w dalszej kolejności uszkodzenia tłoczyska. Producenci siłowników hydraulicznych określają wyżej wymienione jako najczęściej spotykane wady siłowników hydraulicznych (Parker Hydraulics, 2016) (Rexroth, 2019). Pozostałe wady takie jak pęknięcie cylindra, czy też uszkodzenia dławnicy mogą występować, ale nie są wymieniane w roli najczęściej występujących wad. Przy założeniu jednakowych wag dla wskaźników: szacowanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady (O), możliwości wykrycia wady (D) oraz kosztów (C) klasyfikacja wad, które determinują celowość użytkowania systemu jest taka sama dla metody TOPSIS (tab. 22) jak i dla miary odległości Euklidesowskiej (Tabela 23).

Zmiana definicji funkcji realizowanej przez siłownik spowodowała, że przy takiej samej granicznej wartości wskaźnika ($S=9$), znacznie więcej wad zostało wyznaczonych. Dla typowej funkcji realizowanej przez siłownik, która dopuszcza przecieki zewnętrzne, całkowita liczba wad wynosi 17 (tab. 21), natomiast przy założeniu całkowitego braku przecieków liczba wad wzrosła do 26 (tab. 23).

Zmiana w konstrukcji siłownika polegająca na założeniu, że stosowany jest nowatorskie rozwiązanie tłoka oraz jego pakietu uszczelniającego) spowodowała zwiększenie wskaźnika szacowanego prawdopodobieństwa wystąpienia wad dla tłoka i jego uszczelnień (tab. 24).

5.3.2 Analiza układu hydraulicznego

Przeprowadzona analiza FMEA układu hydraulicznego dla trzech realizowanych funkcji wykazała, że wskaźniki znaczenia skutków wady przedstawione w tabelach: 26, 27 i 28. Tabela 27 przedstawia wady, które posiadają niskie wartości pozostałych wskaźników i mogłyby zostać pominięte w klasycznej analizie. Wspomnianymi wadami są:

- a) erozja uszczelnienia zaworu zwrotnego sterowanego,
- b) zużycie uszczelnienia złącza obrotowego,
- c) wady przewodów elastycznych i sztywnych,
- d) wady zaworów.

Analiza funkcji nastawy kąta łopat turbiny oraz pracy na biegu jałowym wykazała, że szacowane prawdopodobieństwo wystąpienia wady osiąga największe wartości dla pompy tłoczkowej a w dalszej kolejności dla oleju (tab. 27, tab. 33). W przypadku awaryjnego hamowania, źródłem zasilania jest akumulator hydrauliczny a nie pompa, stąd największe szacowane prawdopodobieństwo wystąpienia wady uzyskano dla siłownika oraz akumulatora hydraulicznego (tab. 30).

Sumaryczny wskaźnik znaczenia skutków wystąpienia wady przedstawiony w tabeli Tabela 35 wykazał, że dla oleju hydraulicznego uzyskano największe wartości. Również dla oleju dwa inne wskaźniki takie jak szacowane prawdopodobieństwo wystąpienia wady (O) oraz możliwość wykrycia wady (D) osiągają największe wartości. Uzyskane wyniki znajdują potwierdzenie w praktyce inżynierskiej. Producenci i użytkownicy układów hydraulicznych wskazują olej hydrauliczny, pompy oraz siłowniki jako elementy, w których najczęściej dochodzi do awarii (Hannifin Parker), (Slama, 2023), (Rakic, 2000).

6 Podsumowanie

W niniejszej pracy opracowano autorską modyfikację klasycznej metody FMEA skupiając się w szczególności na wyznaczaniu wskaźników znaczenia wady (S), przewidywanego prawdopodobieństwa jej wystąpienia (O) oraz możliwości jej wykrycia (D). Zaproponowano uzupełnienie tradycyjnych wskaźników ryzyka o koszty (C) związane z konsekwencjami wystąpienia wady. W rozdziale trzecim przedstawiono ogólne zarysy klasycznej analizy FMEA oraz przedstawiono sposób definiowania krytyczności poszczególnych wad w odniesieniu do liczby ryzyka, która w tradycyjnej formie przyjmuje postać iloczynu trzech głównych wskaźników ryzyka: znaczenia skutków wady (S), prawdopodobieństwa jej wystąpienia (O) oraz możliwości jej wykrycia (D). Przedstawiono również alternatywne sposoby oceny ryzyka, które są sformalizowane w normach międzynarodowych lub rozwiązaniach stosowanych w przemyśle. W rozdziale tym przedstawiono również typowe problemy klasycznej analizy FMEA, do których należy przede wszystkim zaliczyć dużą jej wrażliwość na wiedzę i doświadczenie użytkowników, subiektywność ocen i wykorzystanie języka naturalnego do określenia wskaźników analizy FMEA.

Rozdział czwarty zawiera opis metod i narzędzi wykorzystanych w pracy. Przedstawiono w nim treść ankiet przygotowanych dla ekspertów z zakresu hydrauliki siłowej. Celem ankiet było zweryfikowanie pewnych aspektów związanych z analizą FMEA. Niestety ze względu na szczególną specyfikę podejmowanego problemu, ankiet nie mogła zawierać pytań, które wymagałyby wysiłku intelektualnego. Niemniej jednak, nawet dla ograniczonego zakresu pytań uzyskano potwierdzenie typowych niedoskonałości klasycznej analizy FMEA: wpływu czynnika ludzkiego (subiektywizm) i problemy z definiowaniem czytelnych kryteriów oceny dla wskaźników krytyczności. W rozdziale tym przedstawiono szczegółowy opis zaproponowanej modyfikacji metody FMEA. Podstawowe wskaźniki S, O, D zostały uzupełnione o dodatkowy wskaźnik związany z kosztami wystąpienia wady. Wyznaczenie wartości znaczenia wady (S) zostało uzyskane poprzez określenie związków przyczynowo-skutkowych dla określonych kategorii składników systemu oraz kategorii wad. Odpowiednie sklasyfikowanie składników systemu oraz potencjalnych wad pozwoliło określić, które wady dla określonych składników uniemożliwiają realizację funkcji systemu, dla której został on stworzony. Klasyfikacja wad może zależeć nie tylko od pełnionych przez system funkcji, ale również od dodatkowych wymagań lub ograniczeń wynikających z zapisów prawnych lub wymagań użytkownika. Prawdopodobieństwo wystąpienia wady zostało zastąpione przez szacowane prawdopodobieństwo (O), które zostało określone na podstawie znanej z teorii niezawodności zależności pomiędzy prawdopodobieństwem wystąpienia wady a liczbą elementów występujących w systemie. Dodatkowo wskaźnik ten uwzględnia występowanie czynników będącymi katalizatorami wad czy też trybu pracy elementu w systemie. Prawdopodobieństwo wykrycia wady (D) oszacowano na podstawie możliwości metod i narzędzi diagnostycznych. Zaproponowano nowy wskaźnik ryzyka (C) określony na podstawie kosztów związanych z wieloaspektowymi skutkami wystąpienia wady takimi jak koszty wymiany elementu, koszty produkcji i inne koszty bezpośrednio związane z pojawieniem się wady.

Zaproponowano ocenę krytyczności wad w dwóch etapach. W pierwszym określa się wskaźnik znaczenia wady (S) na podstawie zdolności systemu do realizacji funkcji dla których został stworzony bez względu na wartości pozostałych wskaźników. W drugim etapie określa się wskaźniki szacowanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady (O), możliwości wykrycia wady (D) oraz kosztów, przy których korzystanie z systemu nie jest racjonalnie uzasadnione. Do klasyfikacji wad, w drugim etapie zastosowano wykorzystanie metody TOPSIS, w której według potrzeb użytkownik może definiować indywidualne wagi dla poszczególnych wskaźników. Do rankingowania krytyczności wad zaproponowano wykorzystanie miary odległości Euklidesowskiej. Dla systemów, które realizują kilka funkcji jednocześnie określono sumaryczny sposób szacowania krytyczności wad uzależniony od kryterium oceny funkcji systemu.

W rozdziale piątym zweryfikowano skuteczność opracowanej metody FMEA na przykładzie układu hydraulicznego stosowanego w turbinach wiatrowych do nastawy kąta natarcia łopat. Opracowana metoda została zaimplementowana zarówno dla pojedynczego elementu układu hydraulicznego jak i całego układu. Analizę FMEA przeprowadzono dla siłownika hydraulicznego dla którego sprawdzono kilka wariantów funkcji, które może on pełnić. Wyniki analizy wykazały, że ocena poszczególnych wad zależy od sposobu definicji funkcji jaką dany system pełni. Wykazano również jak zmieniają się wskaźniki krytyczności w przypadku stosowania nowych, niesprawdzonych wcześniej rozwiązań konstrukcyjnych. Uzyskane wyniki analizy FMEA potwierdziły, że wady jakim są uszkodzenia uszczelnień tłoczyska, tłoka oraz uszkodzenia tłoczyska i dławnicy są wadami krytycznymi, które uniemożliwiają pełnienie podstawowych funkcji. Analiza FMEA całego układu została przeprowadzona dla trzech funkcji, które układ realizuje: nastawa kąta natarcia łopat turbiny, awaryjne hamowanie oraz bieg jałowy. Dla każdej z tych funkcji wyznaczono krytyczne wady, dla których wymienione funkcje nie mogą być realizowane. Ocena krytyczności dla analizowanego układu wykazała potwierdzone praktyką wyniki, które wyszczególniają olej hydrauliczny jako czynnik, który ma decydujący wpływ na pracę układów hydraulicznych. Opracowana metoda dzięki wykorzystaniu relacji przyczynowo-skutkowych pomiędzy uogólnionymi wadami oraz funkcjami systemu umożliwia ograniczenie wpływu wiedzy, doświadczenia oraz subiektywnych ocen użytkowników.

6.1 Wnioski uytylitarne

Opracowana modyfikacja analizy FMEA wykazała następujące jej cechy:

1. Wyznaczenie wskaźników krytyczności S, O, D, C określonych na podstawie związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy składnikami systemu i wadami nie wymaga posiadania specjalistycznej z zakresu analizowanego systemu.
2. Wskaźniki krytyczności mogą być oszacowane na podstawie ogólnodostępnej wiedzy inżynierskiej.
3. Opracowana metoda jest przydatna dla zarówno dla prostych systemów składających się z kilku składników jak i złożonych, realizujących kilka funkcji jednocześnie.
4. Opracowana metoda nie eliminuje opinii ekspertów, ale pozwala na usystematyzowanie wskaźników krytyczności oraz wstępnie przygotować zestawienie potencjalnych wad do dalszej analizy.

6.2 Wnioski przyszłościowe

Na podstawie wykonanej pracy sformułowano następujące wnioski przyszłościowe:

1. Opracowana metoda może zostać wykorzystywana do prowadzenia analiz systemów mechanicznych lub hydraulicznych.
2. Opracowana metoda może być uzupełniona o inne narzędzia związane z analizą powstawania przyczyn wad.
3. Arkusz kalkulacyjny opracowany na potrzeby nowej metody może być łatwo rozbudowany i uzupełniany o nowe narzędzia.

7 Bibliografia

- AIAG & VDA. 2019. *Failure Mode and Effects Analysis*. brak miejsca : Analysis techniques for system reliability, 2019.
- Andersen B. i Fagerhaug T. 2006. *Root Cause Analysis*. Milwaukee : ASQ Quality Press, 2006.
- Anes V. i inni. 2018. A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis. *Quality and Reliability Engineering International*. 2018, Tom 34.
- Aruldoss M., Lakshmi T. M. i Venka V. P. 2013. A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems*. 2013, Tom 1, 1.
- Asmussen M. F., Liniger J. i Pedersen H. C. 2021. Fault Detection and Diagnosis Methods for Fluid Power Pitch System Components—A Review. *Energies*. 14, 2021.
- Bertalanffy L. 1968. *General System Theory*. New York : George Braziller, Inc., 1968.
- Birolini A. 1997. *Quality and Reliability of Technical Systems, 2nd edition*. Berlin : Springer Verlag, 1997.
- Bloch H.P. i Geitner F.K. 1999. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Huston, TX, USA : Gulf Professional Publishing, 1999. Volume 2.
- Braband J. 2003. Improving the Risk Priority Number Concept. *Journal of System Safety*. 2003, Tom 3.
- Braglia M. 2000. MAFMA: Multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2000, 17.
- . 2000. MAFMA: Multi-attribute failure mode analysis. *Int J Qual Reliab Manage*. 2000, Tom 17, 9.
- Braglia M., Frosolini M. i Montanari R. 2003. Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis. *Qual Reliab Eng Int*. 2003, Tom 5, 19.
- Bugdol M. 2008. *Zarządzanie jakością w urzędach administracji publicznej. Teoria i praktyka*. Warszawa : Difin, 2008.
- Carmignani G. 2009. An integrated structural framework to cost-based FMECA: the priority-cost FMECA. *Reliab Eng Syst Saf*. 94, 2009, 4.
- Carpitella S. i inni. 2018. A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case. *Reliability Engineering and System Safety*. 2018, 169.
- Chang D. S. i Sun K.L.P. 2009. Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA. *Journal of Quality & Reliability Management*. 2009, Tom 26.
- Chang K. H., Chang Y. C. i Lai P. T. 2014. Applying the concept of exponential approach to enhance the assessment capability of FMEA. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2014, 25.
- Chen J. K. 2017. Prioritization of corrective actions from utility viewpoint in FMEA application. *Quality and Reliability Engineering International*,. 2017, 33.
- Chin K. S. i inni. 2009. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. *Computers & Operations Research*. 2009, Tom 36.
- Cho S. i inni. 2020. Numerical modeling of the hydraulic blade pitch actuator in a spar-type floating wind turbine considering fault conditions and their effects on global dynamic responses,. *Wind Energy*. 2, 2020, Tom 23.
- Ćwiklicki M. i Obora H. 2011. *Wprowadzenie do metod TQM*. Kraków : Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, 2011.

- Danfoss A/S. 2014. *Failure Analysis and Parts Evaluation*. brak miejsca : Danfoss A/S, 2014.
- Deming E. 2000. *Out of the crisis*. brak miejsca : The MIT Press, 2000.
- Di Bona G. i inni. 2018. Total efficient risk priority number (TERPN): A new method for risk assessment. *Journal of Risk Research*. 2018, 21.
- Dietrych M. 2001. *Podstawy Konstrukcji Maszyn T I*. Warszawa : WNT, 2001.
- Dobrzański L. A. 2014. *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Warszawa : WNT, 2014.
- Donald J., Wulpi L. ed. i Miller B. 2013. *Understanding How Components Fail*. Materials Park, OH, USA : ASM International, 2013.
- Donaldson Filtration Solution. 2012. *Hydraulic Filtration Technical Reference*. 2012.
- Du Y. i inni. 2014. A new method in failure mode and effects analysis based on evidential reasoning. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*. 2014, 5.
- Eaton. <https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/filters-strainers/hpp.resources.html>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- Europe Parker Hannifin Hydraulic Filter Division. 2011. *Guide to Contamination Control– Understanding and Answering the Threat of Contamination*. 2011.
- Fabis-Domagala J., Domagala M. i Momeni H. 2021. A Concept of Risk Prioritization in FMEA Analysis for Fluid. *Energies*. 2021, 14.
- Filo G. i inni. 2018. The idea of fuzzy logic usage in a sheet-based FMEA analysis of mechanical systems. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 183.
- Flitney R. 2014. *Seals and sealing handbook, 6th edition*. brak miejsca : Elsevier Ltd., 2014.
- Fluid Power World. <https://www.fluidpowerworld.com/easy-to-install-pitch-control-in-wind-turbines>. [Online] [Zacytowano: 17 08 2023.]
- Ford Motor Company. 2004. *FMEA Handbook*. Dearborn,MI : Ford Design Institute, 2004.
- Garvin G. A. 1984. *What does product quality really mean*. Cambridge : Sloan Management Review, 1984.
- GAT - Gesellschaft für Antiebstechnik mgH. 2017. Product Catalogue. Geisenheim, Germany : brak nazwiska, 2017.
- Gudanowska A. E. 2010. Wprowadzenie do zarządzania jakością w przedsiębiorstwie produkcyjnym. *Economy and Management*. 2010, 4.
- Hamrol A. 2005. *Zarządzanie jakością z przykładami*. Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005.
- Hannifin Parker. <https://blog.parker.com/site/usa/details-home-page/reduce-failure-of-hydraulic-systems-with-preventive-maintenance-us>. [Online] [Zacytowano:]
- Huang J. i inni. 2020. Failure mode and effect analysis improvement. A systematic literature review and future research agenda. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020, Tom 199.
- Hwang C-L. i Yoon K. 1981. *Multiple Attribute Decision Making, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. brak miejsca : Springer, 1981.
- Hydratech Dellner. <https://www.hydratech-industries.com/industries-applications/wind-power-systems/hydraulic-pitch-systems>. [Online] [Zacytowano: 17 08 2023.]
- Hydratech-Industries. <https://www.hydratech-industries.com/industries-applications/wind-power-systems/hydraulic-pitch-systems>. [Online] [Zacytowano: 17 08 2023.]

- Hydraulics M+S. https://ms-hydraulic.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=129:pap-22%C3%B728&lang=en. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- Hydraulics Parker. *Hydraulic Cylinder Troubleshooting*. brak miejsca : Parker Hydraulics. Bulletin 1242/1-GB.
- Hydron. <https://www.sklep.hydron.com.pl/na-czym-polega-zakuwanie-przewodow-wezy-hydraulicznych>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- IEC. 2018. *60812*. brak miejsca : European Standard, 2018.
- . 2016. *61882, Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide*. brak miejsca : IEC, 2016.
- Ishikawa K. 1976. *Guide to Quality Control*. Tokyo, Japan : Asian Productivity Organization, 1976.
- ISO. 2020. *10100: Hydraulic fluid power — Cylinders — Acceptance tests*. Geneva : ISO, 2020.
- . 2018. *31000 Risk Management - Guidelines*. Geneva : ISO, 2018.
- . 2018. *31010 Risk Management - Risk Assesment Techniques*. Geneva : ISO, 2018.
- Jahangoshai Rezaee M., Salimi A. i Yousefi S. 2017. Identifying and managing failures in stone processing industry using cost-based FMEA. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, 88.
- Jamshidi A. i inni. 2015. A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices. *Applied Soft Computing Journal*,. 2015, Tom 32.
- Kato K. 2002. Classification of wear mechanisms/models. *J. Eng. Tribol*. 2002, Tom 216.
- Koomsap P. i Charoenchokdilok T. 2018. Improving risk assessment for customer-oriented FMEA. *Total Quality Management and Business Excellence*. 2018, 29.
- Kutlu A. C. i Ekmekçioğlu M. 2012. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Syst Appl*. 39, 2012, 1.
- Lee Y-B. i inni. 2020. Failure analysis of a hydraulic power system in the wind turbine. *Engineering Failure Analysis*. 2020, Tom 107.
- Liberti L. i Lavor C. 2017. *Euclidean Distance Geometry: An Introduction*. New York : Springer, 2017.
- Liu H. C. i inni. 2011. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. *Expert Syst Appl*. 38, 2011, 4.
- Liu H-C., Liu L. i Li P. 2014. Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid. *Int J Syst Sci*. 45, 2014, 10.
- Liu H. C. i inni. 2015. A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy Vikor method. *Appl Soft Comput*. 2015.
- Liu H-C. 2016. *FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods*. Singapore : Springer Science+Business Media, 2016.
- Liu H-C. i inni. 2019. Failure mode and effects analysis using multi-criteria decision making methods. A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*. 2019, Tom 135.
- Liu H-C., Liu L. i Liu N. 2013. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*. 2, 2013, Tom 40.

- Liu H-C., You J. X. i You X. Y. 2014. Evaluating the risk of healthcare failure modes using interval. *Comput Ind Eng.* 2014, 78.
- Lo H. W. i Liou J.J. H. 2018. A novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment. *Applied Soft Computing.* 2018, 73.
- Lutyńska K. 1984. *Wywiad kwestionariuszowy. Przygotowanie i sprawdzanie narzędzia badawczego.* Wrocław : Ossolineum, 1984.
- NASA. 1966. *Procedure for Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA).* Washington, D.C. : NASA, 1966.
- Naval Surface Warfare Center. 2011. *Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment.* West Bethesda, Maryland : brak nazwiska, 2011.
- . 2011. *Handbook of Reliability Prediction for Mechanical Equipment.* West Bethesda, MD, USA : Naval Surface Warfare Center, 2011.
- Ng F., Harding J. A. i Glass J. 2017. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2017, 83.
- Pacana A. 2022. *Narzędzia zarządzania jakością.* Rzeszów : Wydawnictwo Politechnika Rzeszowska, 2022.
- Parker Hannifin Corporation., 2014. *Guide to Contamination Standards.* 2014.
- Parker Hannifin Manufacturing SAS. 2013. *Hydraulic Pumps & Motors Vane Troubleshooting Guide, Catalogue HY29-0022/UK.* Vierzon - France : brak nazwiska, 2013.
- Parker. <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Tube-Fittings-Division/FCG-TFD-FastSeal-ORFS-Tube-Connections.pdf>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- Parker Hydraulics. 2016. *Hydraulic Cylinder Troubleshooting, Bulletin 1242/1-GB.* brak miejsca : Parker Hydraulics, 2016.
- Ponar Wadowice SA. <https://www.ponar-wadowice.pl/produkty/rozdzielacze/suwakowe>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- . <https://www.ponar-wadowice.pl/produkty/silowniki>. [Online] [Zacytowano: 06 09 2023.]
- . <https://www.ponar-wadowice.pl/produkty/zawory-sterujace-cisnieniem>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- . <https://www.ponar-wadowice.pl/typ/13-rozdzielacze-nabojowe-elektryczne-on-off-jednostronnie-szczelne-2ures>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- . <https://www.ponar-wadowice.pl/typ/512-zawory-zwrotne-i-odcinajace-zwrotne-nabojowe-uzzd>. [Online] [Zacytowano: 06 09 2023.]
- . <https://www.ponar-wadowice.pl/typ/664-zawory-zwrotne-i-odcinajace-zwrotne-sterowane-nabojowe-pojedynczy-uzsd>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- Rakic R. 2000. The influence of hydraulic oil on the hydraulic system failures. *Tribologia.* 2000, 19.
- Rexroth. <https://www.boschrexroth.com/pl/pl/media-details/2261b9c9-ab87-4f9f-a0fe-f0f643568116>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- . <https://www.boschrexroth.com/pl/pl/search.html?q=re18136-21&lang=PL&origin=header&num=10&s=download>. [Online] [Zacytowano: 05 09 2023.]
- . 2019. *Hydraulic cylinders.* 2019. Operating instructions, RE 07100-B/11.19.
- Rhkhydraulics. <https://rhkhydraulics.com/>. [Online] [Zacytowano: 17 08 2023.]

- SAE. 2017. *AS 13004, Process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA) and Control Plans*. brak miejsca : SAE International, 2017.
- . 1994. *J 1739: Potential Failure Modes and Effect Analysis in Design (Design FMEA) and Potential Failure and Effects Analysis (Process FMEA)*. brak miejsca : SAE International, 1994.
- Safari H., Faraji Z. i Majidian S. 2016. Identifying and evaluating enterprise architecture risks using FMEA and fuzzy VIKOR. *J Intell Manuf.* 27, 2016, 2.
- Saltelli A. i inni. 2008. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. brak miejsca : Willey, 2008.
- Saltelli A. i inni. 2004. *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. brak miejsca : Willey, 2004.
- Savino M. M. i Brun A. 2018. Assessing risk through composite FMEA with pairwise matrix and Markov chains. *International Journal of Quality and Reliability Management.* 2018, 39.
- Selim H., Yunusoglu M. G. i Yilmaz Balaman Ş. 2016. A dynamic maintenance planning framework based on fuzzy TOPSIS and FMEA: Application in an International Food Company. *Quality and Reliability Engineering International.* 2016, 32.
- Serrat O. 2017. The Five Whys Technique. In: Knowledge Solutions. *Knowledge Solutions*. Singapore : Springer, 2017.
- Shaik F. S., Rokonzaman M. i Sajedu K. 2023. *Fire risk assessments and fire protection measures for wind turbines: A review*. brak miejsca : Heliyon, 2023.
- Shewhart W. A. 1939. *From the viewpoint of quality control*. Washington : The Graduate School The Department of Agriculture, 1939.
- Slama D. 2023. *The Digital Playbook*. Cham, Switzerland : Springer, 2023.
- Smith L. R. 2005. Back To The Future At Ford. *Quality Progress.* 2005, Tom 38, 3.
- Stachowiak G. W. 2005. *Wear-Materials, Mechanism and Practice*. Chichester, UK : John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- Stirrup T. S., Chamberlin H. C. i Kelsey L. *Scaled Wind Farm Technology Hydraulic System Failure Modes and Effects Analysis*. New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 : Sandia National Laboratories Albuquerque.
- Sun W. i inni. 2019. Prevention of green energy loss: Estimation of fire hazard potential in wind turbines. *Renewable Energy.* 2019, Tom 140.
- Systemseals. 2014. *Failure Analysis Guide Eliminate Potential and Future Problems*. 2014.
- Tabor D. i Bowden F. P. 1980. *Wprowadzenie do trybologii*. Warszawa : WNT, 1980.
- Taherdoost H. i Madanchian M. 2023. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia.* 2023, 3.
- Taizhou Chuanhu Hydraulic Machinery Co., Ltd. <https://riverlakeco.com/blog/how-to-clean-rust-off-the-hydraulic-cylinder/>. [Online] [Zacytowano: 17 08 2023.]
- Taleb N. N. 2011. *Foiled by randomness, the black swan, the bed of procrustes, antifragile, and skin in the game*. brak miejsca : Penguin, 2011.
- Tang Y., Zhou D. i Chan F.T.S. 2018. AMWRPN: Ambiguity measure weighted risk priority number model for failure mode and effects analysis. *IEEE Access.* 2018, 6.
- USA Military Standard. 1949. *MIL-P 1629, Procedure for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*. Washington, DC, USA : Military Specifications and Standards:, 1949.

- . 2000. *MIL-STD-882, Standard Practice for system Safety*. Washington, DC, USA : Military Specifications and Standards, 2000.
- VDA. 2006. *Volume 4 Chapter: Product and Process FMEA* . brak miejsca : VDA, 2006.
- Velasquez M. i Hester P. 2013. An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*. 2013, 10.
- Watton J. 2007. *Modelling, Monitoring and Diagnostic Techniques for Fluid Power Systems*. London, UK : Springer, 2007.
- Wenting C. i inni. 2020. Review of the application of hydraulic technology in wind turbine. *Wind Energy*. 7, 2020, Tom 23.
- Zadeh L. A. 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*. 1975.
- Zagańczyk A. 2014. Zasady konstruowania kwestionariusza ankiety. *BiTP*. 1, 2014, 33.

8 Spis rysunków

Rys. 1. Tryb awarii według: (AIAG & VDA, 2019).....	10
Rys. 2. Schemat analizy FMEA	12
Rys. 3. Zasada budowy diagramu Ishikawy	16
Rys. 4. Przykładowy schemat zadawania pytań	18
Rys. 5. Poziom ryzyka określany na podstawie wykresów	21
Rys. 6. Schematyczne przedstawienie systemu	31
Rys. 7. Wybór funkcji analizowanego systemu	43
Rys. 8. Wybór elementu analizowanego systemu	43
Rys. 9. Wyniki analizy FMEA w postaci wykresu słupkowego	43
Rys. 10. Elementy układu sterowania kątem natarcia turbiny wiatrowej firmy Hawe Hydraulik:	46
Rys. 11. Schemat układu hydraulicznego	45
Rys. 12. Praca układu na biegu jałowym	47
Rys. 13. Ładowanie akumulatora	47
Rys. 14. Zasilanie siłownika od strony tłoczyska	47
Rys. 15. Zasilanie siłownika od strony tłoka	47
Rys. 16. Pompa tłoczkowa	48
Rys. 17. Filtr wysokociśnieniowy	49
Rys. 18. Siłownik hydrauliczny	49
Rys. 19. Rozdzielacz czterodrogowy, trójpołożeniowy	50
Rys. 20. Zawór przelewowy bezpośredniego działania	50
Rys. 21. Zawór zwrotny	50
Rys. 22. Zawór zwrotny sterowany	51
Rys. 23. Rozdzielacz gniazdowy trójdrogowy dwupołożeniowy	51
Rys. 24. Rozdzielacz gniazdowy dwudrogowy	52
Rys. 25. Przewód elastyczny z zakutą końcówką	52
Rys. 26. Przewód sztywny	52
Rys. 27. Akumulator pęcherzowy	53
Rys. 28. Złącze obrotowe	53
Rys. 29. Zintegrowany układ hydrauliczny wykorzystywany do regulacji kąta natarcia łopat turbiny wiatrowej	54
Rys. 30. Zanieczyszczenia oleju cząstkami stałymi	60
Rys. 31. Wzrost zanieczyszczeń cząstkami stałymi podczas pracy układu	60
Rys. 32. Wskaźniki analizy FMEA dla siłownika	64

9 Spis tabel

Tabela 1. Znaczenie potencjalnych wad (S) (źródło: (AIAG & VDA, 2019))	13
Tabela 2. Szacowane prawdopodobieństwo wystąpienia wady (O) (źródło: (AIAG & VDA, 2019)).....	14
Tabela 3. Możliwości wykrycia wady (źródło: (AIAG & VDA, 2019))	14
Tabela 4. Tabela priorytetów działania (źródło: (AIAG & VDA, 2019)).....	20
Tabela 5. Macierz ryzyka (źródło: (IEC, 2018))	20
Tabela 6. Kwestionariusz ankiety, pytania 1-3	26
Tabela 7. Kwestionariusz ankiety, pytania 4 i 5	27
Tabela 8. Kwestionariusz ankiety, pytania 6-9	28
Tabela 9. Kryteria oceny znaczenia skutków wady	29
Tabela 10. Wartości graniczne klas wady i elementu oraz współczynników korekcyjnych ..	35
Tabela 11. Wprowadzone dane dla analizy FMEA	42
Tabela 12. Wyniki analizy FMEA dla wad, które uniemożliwiają realizację funkcji systemu	44
Tabela 13. Wyniki analizy FMEA dla wad, które nie są akceptowalne, metoda TOPSIS	44
Tabela 14. Wyniki analizy FMEA dla wad, które nie są akceptowalne, miara Euklidesowa	44
Tabela 15. Przykłady wad zmieniających cechy fizyczne elementów.....	55
Tabela 16. Przykłady wad zmieniających cechy fizyczne elementów.....	56
Tabela 17. Przykłady zużycia elementów hydraulicznych.	57
Tabela 18. Przykłady erozji elementów hydraulicznych.....	58
Tabela 19. Przykłady korozji elementów hydraulicznych.	59
Tabela 20. Dane wprowadzone do arkusza analizy FMEA dla siłownika	63
Tabela 21. Zestawienie wad, które uniemożliwiają realizację podstawowej funkcji siłownika	65
Tabela 22. Zestawienie wskaźników FMEA, dla których użytkowanie siłownika nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników	65
Tabela 23. Zestawienie wskaźników FMEA, dla których użytkowanie siłownika nie jest uzasadnione. Ranking na podstawie miary odległości Euklidesowej	66
Tabela 24. Zestawienie wad, które uniemożliwiają realizację podstawowej funkcji siłownika z ograniczeniem: brak przecieków zewnętrznych	67
Tabela 25. Zestawienie wskaźników FMEA, dla których użytkowanie siłownika nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników. Nowatorska konstrukcja tłoka oraz jego uszczelnienia	68
Tabela 26. Arkusz z danymi do analizy FMEA dla funkcji: nastawianie kąta natarcia	71
Tabela 27. Zestawienie wad, dla których nastawianie kąta natarcia turbiny nie jest realizowane	72
Tabela 28. Zestawienie wad, dla których użytkowanie układu nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników	73
Tabela 29. Arkusz z danymi do analizy FMEA dla funkcji: hamowanie turbiny	74

Tabela 30. Zestawienie wad, dla których awaryjne hamowanie nie jest realizowane	75
Tabela 31. Zestawienie wad, dla których użytkowanie układu nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników	75
Tabela 32. Arkusz z danymi do analizy FMEA dla funkcji: praca na biegu jałowym.....	76
Tabela 33. Zestawienie wad, dla których praca układu na biegu jałowym nie jest realizowana	77
Tabela 34. Zestawienie wad, dla których użytkowanie układu nie jest uzasadnione. Ranking wg metody TOPSIS i jednakowych wag dla wszystkich wskaźników	77
Tabela 35. Sumaryczna ocena znaczenia skutków wad dla układu	78

10 Streszczenie pracy doktorskiej mgr inż. Joanny Fabiś-Domagala

W pracy przedstawiono autorską modyfikację klasycznej metody FMEA skupiając się w szczególności na wyznaczaniu wskaźników krytyczności: znaczenia wady, przewidywanego prawdopodobieństwa jej wystąpienia oraz możliwości jej wykrycia. Zaproponowano uzupełnienie tradycyjnych wskaźników ryzyka o wskaźnik kosztów związanych z konsekwencjami wystąpienia potencjalnej wady.

W pracy przedstawiono ogólne zarysy klasycznej analizy FMEA, sposób definiowania krytyczności poszczególnych wad w odniesieniu do liczby ryzyka, która w tradycyjnej formie przyjmuje postać iloczynu trzech głównych wskaźników ryzyka: znaczenia skutków wady, prawdopodobieństwa jej wystąpienia oraz możliwości jej wykrycia. Dokonano analizy literatury w zakresie typowych problemów klasycznej analizy FMEA, do których należy przede wszystkim zaliczyć dużą jej wrażliwość na wiedzę i doświadczenie użytkowników, subiektywność ocen i wykorzystanie języka naturalnego do określenia wskaźników krytyczności.

W celu zweryfikowania problemów klasycznej analizy FMEA przeprowadzono badania ankietowe, które potwierdziły niedoskonałości klasycznej analizy FMEA: wpływu czynnika ludzkiego (subiektywizm) i problemy z definiowaniem czytelnych kryteriów oceny dla wskaźników krytyczności.

Modyfikacja analizy FMEA polegała na odwróceniu toku postępowania klasycznego podejścia. Zaproponowano usystematyzowanie potencjalnych wad ze względu na skutki jakie mogą wywołać w elementach rozważanego systemu. Następnie zdefiniowano związki przyczynowo-skutkowe pomiędzy wadami a elementami systemu co pozwoliło określić skutki

Jakie mogą wywołać w zakresie realizowanych funkcji systemu. Prawdopodobieństwo wystąpienia wady zostało zastąpione poprzez subiektywne szacowane prawdopodobieństwo, które zostało określone na podstawie analizy literatury dotyczącej niezawodności oraz uszkodzeń układów hydraulicznych.

Zaproponowano ocenę krytyczności wad w dwóch etapach. W pierwszym określa się wskaźnik znaczenia wady na podstawie zdolności systemu do realizacji funkcji dla których został stworzony bez względu na wartości pozostałych wskaźników. W drugim etapie określa się wskaźniki szacowanego prawdopodobieństwa wystąpienia wady, możliwości wykrycia wady oraz kosztów, przy których korzystanie z systemu nie jest racjonalnie uzasadnione. Do klasyfikacji wad, w drugim etapie zastosowano wykorzystanie metody TOPSIS, w której według potrzeb użytkownik może definiować indywidualne wagi dla poszczególnych wskaźników. Do rankingowania krytyczności wad zaproponowano wykorzystanie miary odległości euklidesowej. Dla systemów, które realizują kilka funkcji jednocześnie określono sumaryczny sposób szacowania krytyczności wad uzależniony od kryterium oceny funkcji systemu.

Skuteczność opracowanej metody FMEA zweryfikowano na przykładzie układu hydraulicznego stosowanego w turbinach wiatrowych do nastawy kąta natarcia łopat. Opracowana metoda została zaimplementowana zarówno dla pojedynczego elementu układu hydraulicznego jak i całego układu. Analizę FMEA przeprowadzono dla siłownika

hydraulicznego dla którego sprawdzono kilka wariantów funkcji, które może on pełnić. Wyniki analizy wykazały, że ocena poszczególnych wad zależy od sposobu definicji funkcji jaką dany system pełni. Wykazano również jak zmieniają się wskaźniki krytyczności w przypadku stosowania nowych, niesprawdzonych wcześniej rozwiązań konstrukcyjnych. Uzyskane wyniki analizy FMEA potwierdziły typowe wady krytyczne, które uniemożliwiają pełnienie podstawowych funkcji siłownika. Analiza FMEA całego układu została przeprowadzona dla trzech funkcji, które układ realizuje: nastawa kąta natarcia łopat turbiny, awaryjne hamowanie oraz bieg jałowy. Dla każdej z tych funkcji wyznaczono krytyczne wady, dla których wymienione funkcje nie mogą być realizowane. Ocena krytyczności dla analizowanego układu wykazała potwierdzone praktyką wyniki, które wyszczególniają olej hydrauliczny jako czynnik, który ma decydujący wpływ na pracę układów hydraulicznych. Opracowana metoda dzięki wykorzystaniu relacji przyczynowo-skutkowych pomiędzy uogólnionymi wadami oraz funkcjami systemu umożliwia ograniczenie wpływu wiedzy, doświadczenia oraz subiektywnych ocen użytkowników.

11 Summary of the doctoral dissertation of Joanna Fabiś-Domagala, MSc Eng.

The paper presents an original modification of the classic FMEA method, focusing in particular on determining criticality indicators: the significance of the defect, the expected probability of its occurrence, and the possibility of its detection. It was proposed to supplement traditional risk indicators with an indicator of costs related to the consequences of the occurrence of a potential defect.

The paper presents the general outlines of the classic FMEA analysis, the method of defining the criticality of individual defects in relation to the risk number, which in the traditional form takes the form of the product of three main risk indicators: the significance of the effects of the defect, the probability of its occurrence and the possibility of its detection. An analysis of the literature was carried out in the field of typical problems of the classic FMEA analysis, which primarily includes its high sensitivity to the knowledge and experience of users, the subjectivity of assessments, and the use of natural language to determine criticality indicators.

In order to verify the problems of the classic FMEA analysis, surveys were conducted, which confirmed the imperfections of the classic FMEA analysis: the influence of the human factor (subjectivity) and problems with defining clear assessment criteria for criticality indicators.

The modification of the FMEA analysis consisted of reversing the course of the classical approach. It was proposed that potential defects be systematized according to the effects they can cause in the elements of the system under consideration. Then, cause-effect relationships between defects and system elements were defined, which allowed us to determine the effects they can cause in the scope of the implemented system functions. The probability of the occurrence of a defect was replaced by a subjective, estimated probability, which was determined based on the analysis of the literature on the reliability and failures of hydraulic systems.

It was proposed that the criticality of defects be assessed in two stages. In the first stage, the indicator of the significance of the defect is determined based on the ability of the system to perform the functions for which it was created, regardless of the values of the other indicators. In the second stage, the indicators of the estimated probability of the occurrence of a defect, the possibility of detecting the defect, and the costs at which the use of the system is not rationally justified are determined. In the second stage, the TOPSIS method was used to classify defects, in which, according to needs, the user can define individual weights for individual indicators. The Euclidean distance measure was proposed to rank the criticality of defects. For systems that perform several functions simultaneously, a summary method for estimating the criticality of defects was determined, depending on the criterion for assessing the system function. The effectiveness of the developed FMEA method was verified using the example of a hydraulic system used in wind turbines to set the angle of attack of the blades. The developed method was implemented for both a single element of the hydraulic system and the entire system. The FMEA analysis was carried out for a hydraulic actuator, for which several variants of the functions that it can perform were checked. The results of the analysis showed that the

assessment of individual defects depends on the way in which the function that a given system performs is defined. It was also shown how the criticality indicators change in the case of using new, previously untested design solutions. The obtained FMEA analysis results confirmed typical critical defects that prevent the actuator from performing basic functions. The FMEA analysis of the entire system was carried out for three functions that the system performs: setting the angle of attack of the turbine blades, emergency braking, and idle run. For each of these functions, critical defects were determined for which the above functions cannot be performed. The criticality assessment for the analyzed system showed results confirmed by practice, which specify hydraulic oil as a factor that has a decisive influence on the operation of hydraulic systems. The developed method, thanks to the use of cause-effect relationships between generalized defects and system functions, allows for limiting the influence of knowledge, experience, and subjective assessments of users.