*Maciej ZIÓŁKOWSKI,*
*Jacek KROPIWNICKI*

**PTNSS–2011–SC–053**

# Application of FMEA analysis for assessing reliability and risk in biogas-fueled engines operation process

*Abstract: In the paper the proposal for the use of FMEA (Failure mode and effects analysis) of possible failures in industrial installations with combustion engines has been presented. In recent years there has been observed rapid development of distributed energy sector, based on internal combustion engines. Such situation is the result of the policy of renewable energy sources use, especially the use of biogas as a fuel for engines installed in power plants. A large number of realized projects and lack of specialized offices having experiences in such projects realized without proper engineering control caused that the main decisive factor is the minimum investment cost. Targeting only the cost minimization often leads to the choice of solutions not properly matched to use biogas as the fuel. This may lead mainly to some mistakes in engines selection, which may cause an increased failure rate or reducing the overall power plant efficiency. In the paper is presented the practical application of reliability and risk analysis in assessing the correctness of the choice of engines fueled with biogas. In the examples there are presented some mistakes in engines selection and the practical use of FMEA in the risk assessment of the reliability and operation of biogas-fueled engines.*

Key words: *internal combustion engines, reliability analisys, alternative fuels, biogas,power plant designing*

## Wykorzystanie analizy FMEA w ocenie niezawodności i ryzyka eksploatacji silników zasilanych biogazem

*Streszczenie: W pracy zamieszczono propozycję wykorzystania analizy FMEA (ang. Failure mode and effects analysis) - analizy rodzajów i skutków możliwych błędów występujących w instalacjach przemysłowych z silnikami spalinowymi. Obserwowany w ostatnich latach rozwój energetyki rozproszonej, opartej na tłokowych silnikach spalinowych jest wynikiem m.in. prowadzonej polityki rozwoju wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OŹE) związanej z zagospodarowaniem biogazu, który może być wytwarzany w kontrolowanych warunkach w biogazowaniach lub pozyskiwany z wysypisk śmieci. Duża ilość realizowanych projektów spowodowała nagły wzrost ofert związanych z projektowaniem i budową elektrociepłowni biogazowych. Wobec niemalże braku kontroli inżynierskiej nad procesem zamówień i realizacji tych projektów głównych czynnikiem decyzyjnym jest minimalny koszt inwestycyjny. Kierowanie się wyłącznie minimalizacją kosztów często prowadzi do wyboru rozwiązań niedostatecznie dostosowanych do zasilania biogazem. Dotyczy to głównie doboru silników i w konsekwencji może powodować ich zwiększoną awaryjność lub ograniczenie sprawności ogólnej obiektu. W referacie zaprezentowano praktyczne wykorzystanie analizy niezawodności i ryzyka do oceny poprawności doboru silników zasilanych biogazem. Na zamieszczonych przykładach zaprezentowano błędy popełniane podczas doboru silników w energetyce biogazowej oraz przedstawiono praktyczne wykorzystanie analizy FMEA w ocenie niezawodności i ryzyka eksploatacji silników zasilanych biogazem.*

Słowa kluczowe: *silniki spalinowe, analiza ryzyka, niezawodność silników, paliwa alternatywne, biogaz, projektowanie siłowni z silnikami spalinowymi*

## 1. Wstęp

W ostatnich latach w Polsce obserwowany jest znaczny wzrost ilości budowanych elektrociepłowni stacjonarnych z kogeneracyjnymi agregatami prądotwórczymi, wyposażonymi w tłokowe silniki spalinowe. Znaczna część tego typu obiektów jest budowana przy oczyszczalniach ścieków i na komunalnych wysypiskach śmieci, gdzie do zasilania silników wykorzystywany jest biogaz. Wzrost popularności stosowania biogazowych zespołów kogeneracyjnych z silnikami spalinowymi został wywołany m.in. poprzez wprowadzenie limitów emisji $CO_2$ oraz przepisów obligujących do utylizacji biogazu powstającego w naturalny sposób na wysypiskach śmieci i na składowiskach osadów pościekowych w oczyszczalniach ścieków. Dodatkowym mechanizmem wspomagającym rozwój tego sektora energetyki jest wprowadzenie certyfikatów pochodzenia energii. Dodatkowe zyski pochodzące ze sprzedaży certyfikatów powodują, że okres zwrotu kosztów inwestycyjnych, poniesionych na budowę tego typu elektrociepłowni, skrócił się do ok. 5 lat. Jest to na tyle atrakcyjna inwestycja, że coraz więcej starych, wyeksploatowanych ciepłowni węglowych jest modernizowanych na elektrociepłownie z silnikami spalinowymi

zasilanymi gazem ziemnym. Sprawność ogólna takich obiektów często przekracza 80%.

## 2. Problemy projektowania elektrociepłowni z silnikami spalinowymi

W praktyce, wobec braku odpowiedniej gamy rozwiązań modułowych dostosowanych do polskich warunków, proces projektowania elektrociepłowni z silnikami spalinowymi polega na indywidualnym doborze odpowiedniej ilości i mocy zespołów kogeneracyjnych oraz doborze elementów instalacji pomocniczych. Taka sytuacja powoduje iż całość systemu energetycznego jest składana z wielu urządzeń i rozwiązań lepiej lub gorzej ze sobą współpracujących. Niestety na podstawie obserwacji zrealizowanych rozwiązań można stwierdzić iż dosyć często zdarzają się błędy zarówno w doborze zespołów prądotwórczych jaki i wyposażenia dodatkowego [5, 6, 7].

Najczęściej popełnianym błędem w doborze zespołów prądotwórczych jest branie pod uwagę uśrednionych wartości przewidywanych parametrów pracy zespołów. Brak analizy przewidywanego rozkładu obciążeń, a zwłaszcza udziałów poszczególnych poziomów obciążeń w rocznym czasie eksploatacji agregatów może powodować błędy w doborze agregatów i skutkować koniecznością ich późniejszej eksploatacji przy obciążeniach dalekich od optymalnych, co głównie wpływa na wzrost zużycia paliwa. Przeciętny czas zdatności do eksploatacji tego typu silników to 10-20 lat, zatem wspomniane błędy będą skutkować znacznymi stratami finansowymi kumulowanymi w całym okresie eksploatacji silników. Szczególnie często błędy w doborze ilości i wielkości agregatów są popełniane w sytuacji wykorzystywania ich do utylizacji biogazu. Zwłaszcza w przypadku utylizacji biogazu wysypiskowego, kiedy trudno jest poprawnie oszacować zarówno skład jak i ilość biogazu pozyskiwanego z wysypiska w przyszłości. Najczęściej wykonywane są próbne odwierty i na podstawie wyników badań próbek gazu określane są jego przyszłe parametry. Na skład i ilość pozyskiwanego biogazu ma wpływ wiele niezależnych parametrów, co uniemożliwia jednoznaczne określenie parametrów pozyskiwanego biogazu w przyszłości, a należy zwrócić uwagę na to, że eksploatacja wysypiska trwa ok. 20 lat – czyli mniej więcej tyle ile wynosi żywotność silników. Dobór małej ilości agregatów o dużej mocy powoduje brak możliwości optymalnego dostosowywania mocy pracujących agregatów do ilości aktualnie pozyskiwanego biogazu. Często dochodzi do sytuacji, w której agregaty, ze względu na spadek ilości dostępnego biogazu, pracują z częściowymi obciążeniami. W odwrotnej sytuacji, nadmiaru biogazu, musi być on spalany w pochodni. W obu przypadkach jest to utrata potencjalnego dochodu związanego z niewykorzystaniem pełnego potencjału do produkcji energii elektrycznej.

Większość firm projektujących i sprzedających elektrociepłownie zasilane gazem wysypiskowym nie bierze pod uwagę dynamiki zmian składu i intensywności pozyskiwania biogazu, projektując system tak, by spełniał on warunki kontraktu na chwile obecną oraz był możliwie tani. Koszt inwestycyjny zresztą gra tu główną rolę ponieważ wysypiska należą do gmin, budowa elektrociepłowni realizowana jest ze środków publicznych a wykonawca musi być wybierany w drodze przetargu. Niestety na skutek braku kontroli inżynierskiej nad konstruowaniem warunków przetargu i ich realizacji przez wykonawcę, w postępowaniu przetargowym głównym kryterium jest najniższa cena. Skutkuje to zakupem najtańszych i najprostszych rozwiązań, niedostosowanych do warunków zasilania biogazem wysypiskowym. Systemy takie nie osiągają nominalnej sprawności na czym traci gmina. Brak odpowiedniej świadomości technicznej osób odpowiedzialnych za tego typu obiekty powoduje, że problem stopnia wykorzystania biogazu jest pomijany.

Najczęściej spotykane błędy popełniane podczas projektowania systemów utylizacji biogazu (głównie na wysypiskach śmieci) wymieniono poniżej:

- zbyt mała ilość agregatów i brak zróżnicowania ich mocy uniemożliwiający optymalne dostosowanie mocy elektrowni do ilości pozyskiwanego biogazu;
- brak poszukiwania możliwości zagospodarowania ciepła odpadowego silników. Należy poszukiwać potencjalnych odbiorców ciepła lub zorganizować takie odbiory we własnym zakresie: poprzez np. wybudowanie basenu, kompleksu szklarni itp. Ewentualnie budowa układów trigeneracyjnych służących do produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu;
- niewłaściwy dobór silników, wyposażonych w układy sterowania niedostosowane do zasilania silnika biogazem o mocno zmiennej zawartości metanu;
- barak odpowiedniego wyposażenia silników, zabezpieczającego przed występowaniem spalania stukowego;
- brak systemów wzbogacania biogazu, które umożliwiałyby spalanie biogazu w silnikach nawet w okresach bardzo niskiej zwartości metanu (poniżej 30% gdzie wobec braku takiej sytuacji biogaz musi być spalany w pochodni);
- brak filtrów zabezpieczających silniki przed wpływem krzemionki niesionej przez biogaz.

Oczywiście tylko cześć powyższych podpunktów można traktować jako błędy projektowe, mogące skutkować pogorszeniem parametrów



MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

energetycznych elektrowni lub elektrociepłowni. Część wymienionych błędów dotyczy wyposażenia dodatkowego wpływającego na niezawodność i trwałość głównie silników jako największych i najbardziej kosztownych elementów systemu. Decyzję co do zaangażowania dodatkowych środków inwestycyjnych, przeznaczonych na polepszenie wyposażenia systemu energetycznego powinny być podejmowane w oparciu o rzetelną wiedzę inżynierską i doświadczenia eksploatacyjne. Jednym z narzędzi wspomagających podejmowanie tego typu decyzji jest analiza niezawodności i ryzyka eksploatacji tego typu obiektów [2].

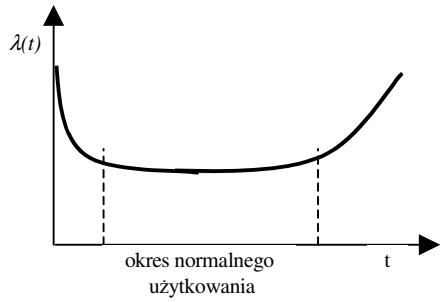
## 2. Analiza niezawodności i ryzyka w projektowaniu i eksploatacji obiektów przemysłowych

Jeszcze do niedawna określenie niezawodności pracy systemu przemysłowego np. elektrociepłowni polegało na ocenie eksperckiej, która nie zawsze gwarantowała uzyskanie obiektywnych wyników. Obecnie istnieją narzędzia i bazy danych niezawodnościowych, które umożliwiają zastosowanie nowoczesnych metod oceny niezawodności i ryzyka eksploatacji tego typu systemów. Metody analizy niezawodności i ryzyka, a w szczególności metody ilościowe mogą wspomagać wybór i dostarczać podstaw do podejmowania decyzji, uzasadnionych technicznie i ekonomicznie, dotyczących budowy i funkcjonalności obiektu będącego w stadium projektowania, a także dotyczących eksploatacji, remontów, przeglądów, modernizacji etc.

Ilościowa analiza niezawodności pozwala na uzyskanie wymiernych i porównywalnych wyników, lecz wymaga sformalizowanego podejścia, w którym funkcjonują następujące pojęcia [1, 3]:

- **funkcja niezawodności** – $R(t)$ – prawdopodobieństwo znajdowania się obiektu lub elementu systemu w stanie zdatności w czasie od 0 do t;
- **funkcja zawodności** – $F(t)=1-R(t)$ – prawdopodobieństwo znajdowania się lub przejścia obiektu w stan niezdatności w czasie od 0 do t;
- **gęstość prawdopodobieństwa** – $f(t)=-d/dt\,[R(t)]$ – pogarszanie się niezawodności obiektu (na jednostkę czasu);
- **intensywność uszkodzeń** – $\lambda(t)=f(t)/R(t)$ – względne pogarszanie się niezawodności obiektu (na jednostkę czasu), często oznaczane jako FR (ang. Failure Rate);
- **empiryczna intensywność uszkodzeń** – $\lambda(t)=n/\tau$ gdzie: $n$ – ilość uszkodzeń (przypadków niezdatności), $\tau$ – sumaryczny czas egzystencji lub pracy obiektów (w jednorodnym zbiorze).
- **średni czas pomiędzy awariami** – $MTBF=1/\lambda$ – (MTBF – ang. Mean Time Between Failures)

Do opisu przebiegu zmienności funkcji gęstości prawdopodobieństwa najczęściej stosowane są modele bazujące na rozkładzie wykładniczym, w którym intensywność uszkodzeń jest niezależna od długości okresu eksploatacji obiektu [3]. Rzeczywisty, ustalony eksperymentalnie, przebieg zmienności funkcji niezawodności najczęściej przybiera kształt „wannowy" przedstawiony na rys. 1.




Rys. 2. Przykład struktury niezawodnościowej [2]

Na wykresie można wyróżnić trzy okresy eksploatacji. Pierwszy – tzw. okres „wieku dziecięcego" charakteryzuje się zwiększona ilością obserwowanych niezdatności. Są to usterki wywoływane błędami w produkcji, wadami materiałowymi itp. Niezdatności w tym okresie pojawiają się dosyć szybko i nie są związane normalnym zużyciem elementów. Drugi okres – normalnego użytkowania – jest okresem charakteryzującym normalną eksploatację, w której ilość pojawiających się niezdatności jest mniej więcej stała. Trzeci okres, to okres wskazujący na wyeksploatowanie elementu, charakteryzuje się wzrostem ilości rejestrowanych usterek i wskazuje na konieczność przeprowadzenia remontu lub wymiany elementu na nowy.

Znajomość wskaźników niezawodności elementu, czy systemu umożliwia przeprowadzenie analizy ryzyka, które jest definiowane jako kombinacja częstości lub prawdopodobieństwa wystąpienia określonego zdarzenia niebezpiecznego i konsekwencji tego zdarzenia (dotkliwości skutków, „wagi następstw")[1].

$$R_s(t)=\Sigma\, \lambda(t)_i \cdot C_i$$

gdzie:

$R_s(t)$ – miara ryzyka (poziom ryzyka) obiektu składającego się z $i$ elementów,

$\lambda(t)_i$ – intensywność uszkodzeń elementu $i$,

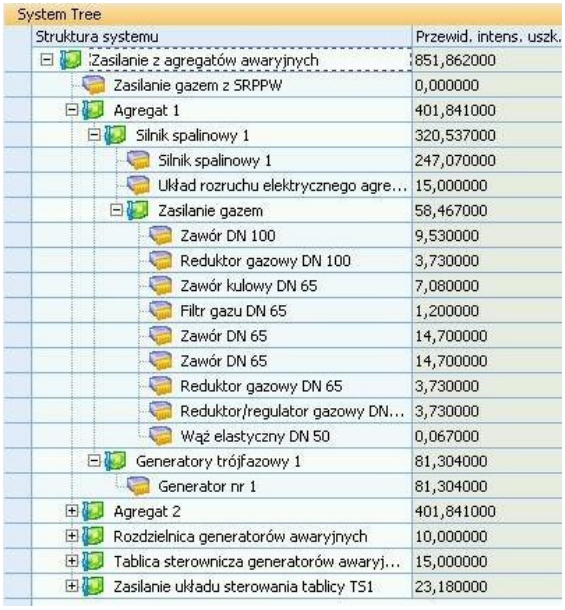
$C_i$ – miara konsekwencji niezdatności elementu $i$.

W celu określenia intensywności uszkodzeń rozpatrywanego systemu należy zbudować model niezawodnościowy analizowanej struktury, który



MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

następnie jest podstawą do wykonywania dalszych operacji. Zakres i szczegółowość modelu najczęściej zależą od celu prowadzenia analiz. Do celów oceny rożnych wariantów projektowych najczęściej modelowane są kompletne systemy ale w znacznym uproszczeniu. Do prowadzenia analiz mających na celu rozwiązywanie problemów eksploatacyjnych modele są mniejsze ale bardziej szczegółowe. Przykład struktury niezawodnościowej, opracowanej dla elektrowni awaryjnej z dwoma agregatami zasilanymi gazem ziemnym przedstawiono na rys. 2., gdzie jak widać główny nacisk położono na analizę niezawodności ścieżki paliwowej. Prezentowane wartości intensywności zostały zaczerpnięte z bazy danych [4], dotyczą tzw. okresu normalnej eksploatacji i odnoszą się do $10^6$ godzin kalendarzowych.




Rys. 2. Przykład struktury niezawodnościowej

Ważnym elementem budowy struktury niezawodnościowej jest określenie intensywności uszkodzeń poszczególnych elementów struktury, na podstawie których następnie wyznaczana jest sumaryczna intensywność uszkodzeń całego systemu. Wartości wskaźników intensywności uszkodzeń mogą być wyznaczane jako empiryczna intensywność uszkodzeń na podstawie obserwacji eksploatacyjnych. Najczęściej jednak brak jest danych eksploatacyjnych, lub ilość obserwacji jest zbyt mała by wartość intensywności uszkodzeń była wiarygodna. Należy wówczas posłużyć się bazą danych o intensywności uszkodzeń.

Podstawowe kryteria wyboru bazy danych to łatwość obsługi i dostępność danych oraz duża ilość i wysoka jakość danych. Należy zaznaczyć, że powyższe kryteria okazują się w praktyce sprzeczne, tj. bazy o łatwym dostępie zwykle nie cechują się wysoką jakością danych.

W tabeli 1 podano przykładowy wykaz danych statystycznych, które powinna posiadać dobra baza danych niezawodnościowych. Taki zakres danych stanowi podstawę profesjonalnej analizy niezawodności niezawodności układów i systemów.

**Tabela 1**

Wykaz danych statystycznych odnoszących się do niezawodności elementu [4]

| Wskaźniki niezawodności i dane pomocnicze | | Uwagi, objaśnienia |
|---|---|---|
| $\lambda$, $FR$ | Intensywność uszkodzeń (całkowita) (*Failure Rate, total*) | Wartości FR, w celu ułatwienia odczytu, są odniesione do $10^6$ godzin kalendarzowych Pożądane jest podawanie $FR_{crit}$ w rozbiciu na poszczególne rodzaje uszkodzeń/niezdatności |
| $FR_{crit}$ | Intensywność uszkodzeń krytycznych (*Failure Rate, critical failures*) | |
| $FR_{deg}$ | Intensywność uszkodzeń upośledzających funkcje elementu (*Failure Rate, degrading failures*) | |
| $FR_{inc}$ | Intensywność uszkodzeń inicjalnych (*Failure Rate, incipient failures*) | |
| $N/\tau$ | Empiryczna intensywność uszkodzeń (*Statistic Estimator of Failure Rate*) | Statystyczna ilość uszkodzeń w zbiorze elementów danego typu (który stanowił podstawę wykonania statystyki), w odniesieniu do jednego elementu i do $10^6$ godzin kalendarzowych |
| $X$ | Współczynnik wykorzystania (*Utility factor*) | Iloraz sumy czasu pracy elementów w zbiorze (który stanowił podstawę wykonania statystyki) przez łączny czas pozostawania elementów w instalacji |
| Ilość elementów | | Dotyczy zbioru elementów, który był przedmiotem eksperymentu i stanowił podstawę wykonania statystyki |
| Ilość instalacji | | |
| Warunki środowiskowe | | Podczas przeprowadzania eksperymentu |
| Średni czas przywrócenia sprawności elementu | | W odniesieniu do poszczególnych rodzajów uszkodzeń/niezdatności |

W tabeli 2 przedstawiono przykładowe dane niezawodnościowe silników tłokowych zasilanych gazem ziemnym, napędzających prądnice, zainstalowanych na platformach wydobywczych i produkcyjnych. Dane pochodzą ze statystyki prowadzonej dla zbioru 30 silników, eksploatowanych w 16 różnych instalacjach przemysłowych typu offshore. Sumaryczny czas pracy silników - 183800 godzin. Sumaryczny czas obserwacji silników (godziny kalendarzowe) – 280300 godzin. Dodatkowe dane (nieuwzględnione w tabeli 3):

- niezdatności, których konsekwencją była naprawa o pracochłonności przekraczającej 80



MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

roboczogodzin (rbg), opisane jako „uszkodzenie konstrukcji" i „inne", wystąpiły w danym zbiorze silników 3 razy, przy czym 1 raz zostały zakwalifikowane jako uszkodzenie krytyczne i 2 razy jako uszkodzenie degradujące;

- empiryczna intensywność uszkodzeń, których konsekwencją była naprawa o pracochłonności przekraczającej 80 rbg, wyniosła 10,7. W przeliczeniu daje to 0,093 przypadku na rok, a więc przy eksploatacji jednego silnika podlegającego właściwej obsłudze technicznej, przy współczynniku wykorzystania ok. 0,66, przewidywany jest 1 przypadek takiej niezdatności na ok. 11 lat.

Duży zakres danych niezawodnościowych umożliwia optymalne dopasowanie danych niezawodnościowych do rozpatrywanej struktury, co znacznie wpływa na jakość wyników późniejszych analiz dotyczących określania ryzyka eksploatacyjnego.

**Tabela 2**

Przykładowy zestaw danych niezawodnościowych dla stacjonarnych silników spalinowych zasilanych gazem ziemnym [4]

| Wskaźniki niezawodności | | Uwagi, objaśnienia |
|---|---|---|
| $\lambda$, $FR$ | 465,50 | w przedziale ufności 90% min. 154,18; maks. 913,12 |
| $N/\tau$ | 481,55 | w przeliczeniu - ok. 4 przypadków niezdatności (wszystkich rodzajów) na rok |
| $FR_{crit}$ | 48,00 | w przedziale ufności 90% min. 5,74; maks. 124,44 |
| $N/\tau_{crit}$ | 49,94 | w przeliczeniu - ok. 0,44 przypadku niezdatności (wszystkich rodzajów) na rok |
| $FR_{deg}$ | 125,42 | w przedziale ufności 90% min. 46,64; maks. 235,31 |
| $FR_{inc}$ | 231,95 | w przedziale ufności 90% min. 42,54; maks. 546,16 |
| $X$ | 0,6557 | |

## 3. Analiza FMEA

Analiza FMEA (ang. Failure mode and effects analysis - analiza rodzajów i skutków możliwych błędów) stanowi przydatne narzędzie wykorzystywane zarówno podczas projektowania (do oceny różnych wariantów rozwiązań konstrukcyjnych) jak również w trakcie eksploatacji (do oceny ryzyka wystąpienia określonych niezdatności). Analiza polega na określeniu wszystkich przyczyn i skutków zaistnienia analizowanej niezdatności oraz ocenie ryzyka związanego z ich występowaniem. Ryzyko jest ustalane na podstawie wartości wskaźnika intensywności występowania niezdatności (np. na podstawie inf. z bazy danych, lub własnych obserwacji) oraz wartości wskaźnika skutków (następstw) zaistnienia niezdatności. Wartości wskaźnika określającego następstwa są ustalane na podstawie miar konsekwencji wystąpienia awarii, które mogą uwzględniać następujące czynniki: straty finansowe związane z przestojem i ograniczeniem bądź brakiem zdolności produkcyjnej, zagrożenia dla ludzi i środowiska czy utrata zaufania klientów i in..

Analiza FMEA ułatwia podejmowanie decyzji, które wcześniej często były podejmowane na subiektywnie na podstawie indywidualnej wiedzy i doświadczenia projektanta. W przypadku konstruowania lądowych siłowni z silnikami spalinowymi zastosowanie analizy FMEA ułatwia i systematyzuje proces podejmowania decyzji co do doboru elementów wyposażenia siłowni oraz zakresu oprzyrządowania silnika. W tabeli 3 przedstawiono przykład takiej analizy przeprowadzonej na potrzeby doboru elementów wyposażenia silnika celem dostosowania go do zasilania biogazem wysypiskowym. Wartości wskaźników intensywności występowania i konsekwencji przyjęto na podstawie danych eksploatacyjnych zebranych podczas eksploatacji silników na wysypisku śmieci [5, 6, 7].

**Tabela 3**

Przykład zastosowania analizy FMEA do doboru silnika zasilanego gazem wysypiskowym

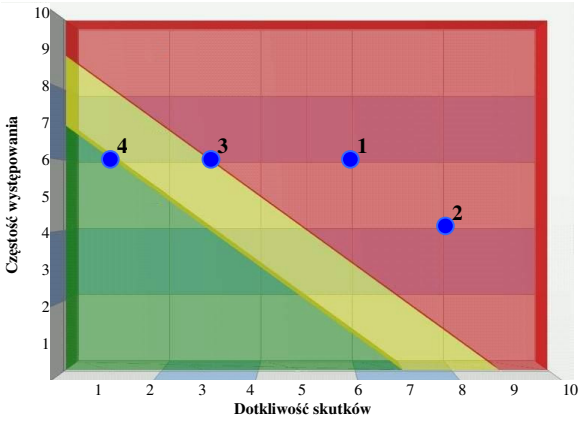
| Element/ system | Wariant konstrukcji | Rodzaj uszkodzenia/ zdarzenia | Przyczyna/ uszkodzenie | Skutek lokalny | Skutek końcowy | Konse-kwencje | Częstość występo-wania | Ryzyko |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Układ sterowania silnikiem | **1.** Z ograniczoną możliwością kompensacji zmian składu biogazu | Wystąpienie spalania stukowego | Wzrost zawartości metanu w biogazie | Uszkodzenie tłoków i głowic | Wyłączenie silnika z eksploatacji na okres 2 tygodni i znaczne koszty naprawy | 6 | 6 | 36 |
| | **2.** J. w. z ograniczeniem maksymalnej mocy silników | | | Uszkodzenie tłoków i głowic | | 8 | 4 | 32 |
| | **3.** Zainstalowanie czujników spalania stukowego | | | Odstawienie silników | Czasowe wyłączenie silników z eksploatacji, lub ręczne ograniczenie mocy maksymalnej w okresie nieodpowiedniego składu biogazu | 3 | 6 | 18 |



MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **4.** Wyposażenie w układ sterowania umożliwiający kompensację dużych zmian składu biogazu | | | Okresowe ograniczenie mocy silników, w krytycznej sytuacji odstawienie silników | Okresowe ograniczenie mocy silników, w krytycznej sytuacji odstawienie silników | 1 | 6 | 6 |

Graficzne zobrazowanie wyników analizy dla wariantów konstrukcji opisanych w tab. 3 przedstawiono na rys. 3 w postaci matrycy ryzyka.




Rys. 2. Matryca ryzyka dla wariantów konstrukcji opisanych w tab. 3

Jak widać rozwiązania 1 i 2 niosą ze sobą zbyt duże ryzyko wystąpienia awarii (występują na czerwonym tle). Rozwiązanie 3 jest dopuszczalne (tło żółte), natomiast z punktu widzenia ponoszonego ryzyka najlepsze rozwiązanie prezentuje p.4 (tło zielone), przy czym charakteryzuje się ono największym kosztem inwestycyjnym. Biorąc pod uwagę powyższe optymalnym jest rozwiązanie 3 gwarantujące dopuszczalny poziom ryzyka przy umiarkowanych kosztach.

## 4. Podsumowanie

Wykorzystanie nowoczesnych narzędzi do oceny niezawodnościowej stosowanej w procesach decyzyjnych dotyczących projektowania i eksploatacji obiektów przemysłowych, w tym również instalacji z tłokowymi silnikami spalinowymi, umożliwia znaczne poszerzenie zakresu prowadzonych analiz oraz wyeliminowanie wielu błędów wynikających z subiektywnych decyzji podejmowanych przez projektantów i eksploatatorów. Przedstawiony prosty przykład pokazuje w jaki sposób można stosować analizę FMEA do zastosowań silnikowych. Poza opisywanymi powyżej korzyściami zastosowania tego typu narzędzi, jasne zasady podejmowania decyzji i możliwość klarownej prezentacji wyników mogą być przydatne podczas argumentacji podjętych decyzji przed organami finansowymi, dla których subiektywna argumentacja ekspercka nie zawsze musi być przekonywująca.

## Literatura


[1] Aven T.: Fundations of Risk Analysis. A Knowledge and Decision-Oriented Perspective. John Wiley & Sons Ltd. 2003.

[2] Jędrysik P., Ziółkowski M.: Niezawodność siłowni biogazowej z silnikami spalinowymi. Energetyczne wykorzystanie biomasy w działalności gospodarczej, monografia / pod red. M. Jasiulewicza. Wyd. uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2009.

[3] Modarres M., KaminskiyM., Krivtsov V.: Reliability Engineering and Risk Analysis. Marcel Dekker, Inc. 1999.

[4] SINTEF Industrial Management: OREDA Offshore Reliability Data. 4th Edition. Det Norske Veritas (DNV) 2002.

[5] Ziółkowski M Balcerski A.: Wybrane zagadnienia wykorzystania biogazu jako paliwa silników spalinowych w skojarzonych układach energetycznych. Materiały konf. XXVIII Sympozjum Siłowni Okrętowych SYMSO 2007, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia 2007, Polska

[6] Ziółkowski M.: Wstępne badania identyfikacyjne elektrociepłowni kogeneracyjnej z silnikami spalinowymi zasilanymi paliwem gazowym. Materiały konf. XXX Sympozjum Siłowni Okrętowych SYMSO 2009. Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2009, Polska.

[7] Ziółkowski M.: Some problems with operation of engines fueled with landfill biogas. Journal of KONES Powertrain and Transport. - Vol. 17, iss. 4 (2010).




MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Mr Ziółkowski Maciej, DEng. – assistant professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Gdańsk University of Technology.

*Dr inż. Maciej Ziółkowski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.*

Mr Kropiwnicki Jacek, DEng. – assistant professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Gdańsk University of Technology.

*Dr inż. Jacek Kropiwnicki – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.*

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl