

RISK-BASED INSPECTION

CZĘŚĆ 2

ZASADY PROWADZENIA OBLICZEŃ RYZYKA



TOMASZ KLINKOSZ

Ekspert Urządzeń
Ciśnieniowych
Dział Oceny Zgodności
Urząd Dozoru Technicznego
Oddział w Gdańsku

W poprzednim artykule, który ukazał się w biuletynie INSPEKTOR na początku bieżącego roku, pisałem o tym, co to jest Risk-based Inspection, oraz o ogólnej koncepcji zarządzania ryzykiem urządzeń ciśnieniowych z zastosowaniem tej metodologii. W materiale tym znaleźć można informacje, jakie są kluczowe elementy RBI oraz w jaki sposób ją wdrożyć i jakie korzyści można uzyskać z wdrożenia skutecznie działającego Programu RBI.

Podążając od ogółu do szczegółu, zapraszam do głębszego zapoznania się ze sposobem wyznaczania ryzyka, z zastosowaniem metodologii RBI opartej na zasadach opisanych w standardzie API RP 581 3rd. edition, publikowanym przez Amerykański Instytut Naftowy (American Petroleum Institute). Zagłębienie się w metodologię wymaga przypomnienia kilku podstawowych pojęć.

Metodologia RBI, jak z samej nazwy wynika, to proces zarządzania ryzykiem, które można zdefiniować w ogólny sposób jako wpływ niepewności na cele [1].

W kontekście celu, dla którego określamy wartość **ryzyka** w RBI, można zdefiniować je jako połączenie **prawdopodobieństwa** wystąpienia jakiegoś zdarzenia w rozpatrywanym okresie i **konsekwencji** (zazwyczaj negatywnych) związanych z tym zdarzeniem [2]. Jeśli prawdopodobieństwo i skutki zostaną wyrażone liczbowo, to ryzyko jest ich iloczynem [3]. Można zatem wyrazić je zależnością:

$$R(t) = P(t) \cdot C \quad (1)$$

gdzie:

R(t) – ryzyko

P(t) – prawdopodobieństwo

C – konsekwencje

R(t) – RYZYKO

RBI znajduje swoje zastosowanie najczęściej do zarządzania ryzykiem urządzeń ciśnieniowych w przemyśle rafineryjnym i petrochemicznym, w którym konsekwencje wiążące się często z uwolnieniem substancji niebezpiecznych o właściwościach palnych, wybuchowych czy toksycznych wynikają z uszkodzenia urządzeń ciśnieniowych. Można zatem zależność (1) zapisać w postaci:

$$R(t) = POF(t) \cdot COF \quad (2)$$

gdzie:

R(t) – ryzyko

POF(t) – prawdopodobieństwo uszkodzenia (*probability of failure*)

COF – konsekwencje uszkodzenia (*consequence of failure*)

W tym miejscu należy odpowiedzieć również na istotne pytanie – co reprezentuje wyliczone w powyższy sposób ryzyko? Poszukując odpowiedzi, trzeba zastanowić się nad pojęciami ryzyka **absolutnego (bezwzględnego)** oraz tzw. **ryzyka względnego**.

Obliczanie ryzyka jest bardzo złożone. Wynik jest funkcją wielu czynników, które mogą wpływać na ryzyko.

Obliczanie **BEZWZGLĘDNEGO RYZYKA** może być bardzo czasochłonne i kosztowne, a często nawet niewykonalne z odpowiednią dokładnością,

ponieważ ilość niewiadomych może być zbyt duża. Potencjalne rozszczelnienie urządzenia ciśnieniowego w instalacji przemysłowej może być spowodowane kombinacją wielu czynników, takich jak: degradacja materiału konstrukcyjnego, błędy konstrukcyjne i montażowe, niesprawność urządzeń zabezpieczających, pożar, sabotaż i wiele innych. Określenie wartości ryzyka obejmującego wszystkie czynniki i ich wzajemne zależności może nie być możliwe lub być nieopłacalne ekonomicznie. RBI koncentruje się na systematycznym określeniu ryzyka względnego wynikającego z konsekwencji pogorszenia się stanu technicznego urządzeń na skutek oddziaływania aktywnych mechanizmów degradacji [4]. W ten sposób można uszeregować urządzenia lub ich komponenty względem wartości ryzyka wynikającego z określonych przyczyn i wówczas określić niezbędne działania mające na celu jego redukcję do poziomu akceptowalnego.

Na tym etapie wiemy już, że RBI pozwala na określenie dla urządzeń RYZYKA WZGLĘDNEGO będącego funkcją ich stanu technicznego, który w większości przypadków jest między innymi zależny od czasu eksploatacji, czyli czasu ekspozycji na warunki powodujące jego degradację. W RBI stosuje się tzw. współczynnik uszkodzenia (Damage Factor, DF), pozwalający uwzględnić przyspieszoną degradację urządzenia w wyniku oddziaływania aktywnych mechanizmów degradacji.

Można zatem opisać **ryzyko rozszczelnienia urządzenia wynikające z uszkodzenia powodowanego pogorszeniem jego stanu technicznego, na skutek oddziaływania mechanizmów degradacji**, zależnością:

$$R(t) = \underbrace{gff \cdot FMs}_{POF(t)} \cdot Df(t) \cdot COF \quad (3)$$

gdzie:

$R(t)$ – ryzyko

gff – prawdopodobieństwo awarii wynikające z danych generycznych (generic failure frequency)

FMs – współczynnik systemu zarządzania bezpieczeństwem

$Df(t)$ – współczynnik uszkodzenia (DF)

COF – konsekwencje uszkodzenia (consequence of failure)

POF (t) – PRAWDOPODOBIEŃSTWO USZKODZENIA (PROBABILITY OF FAILURE)

RYZYKO WZGLĘDNE, określane w metodologii RBI wg standardu API RP 581, wyznacza się zatem jako iloczyn kilku niżej wymienionych czynników.

- Prawdopodobieństwo awarii (gff) – wyznaczone dla określonych typów komponentów na podstawie dużej populacji danych uszkodzeń komponentów, które nie obejmują oddziaływania określonych mechanizmów degradacji. Wartości współczynnika opublikowane są w standardzie API RP 581 dla określonych komponentów urządzeń.
- Współczynnik (FMs) – reprezentuje wynik audytu systemu zarządzania bezpieczeństwem procesowym (omówiony w poprzednim wydaniu biuletynu INSPEKTOR).
- Współczynnik uszkodzenia ($Df(t)$) – zasadniczą funkcją tego współczynnika jest statystyczna ocena ilości uszkodzeń, które mogą występować w urządzeniu w funkcji czasu jego eksploatacji, oraz skuteczności wykonywanych inspekcji mających na celu ocenę tych uszkodzeń.

UWAGA

Należy pamiętać, że współczynnik uszkodzenia nie służy do oceny, czy oceniany komponent nadaje się do dalszej eksploatacji, a jedynie do planowania inspekcji.

Jeżeli w wyniku prowadzonych inspekcji stwierdzone zostaną uszkodzenia, ich ocenę powinno przeprowadzić się z zastosowaniem metodologii Fitness-For-Service opisaną standardem API RP 579-1/ASME FFS-1.

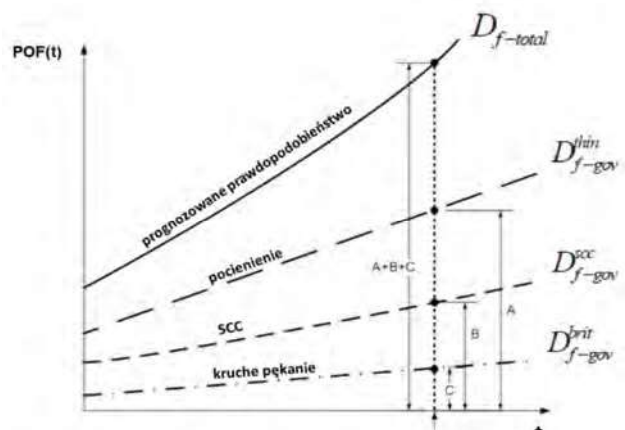
Na podstawie uzyskanych wyników należy podjąć decyzję o dalszej eksploatacji (w poprzednim wydaniu biuletynu INSPEKTOR omówiono ogólną koncepcję tej metodologii).

Współczynnik ($Df(t)$) jest modyfikatorem dla danych generycznych opisanych przez (gff), tak aby określić specyficzne dla danego komponentu prawdopodobieństwo uszkodzenia uwzględniające tempo degradacji i skuteczność wykonywanych inspekcji.

Zasady wyznaczania współczynnika uszkodzeń ($Df(t)$) opisano w rozdziale 2 standardu API RP 581, który zawiera procedury jego obliczania dla następujących grup mechanizmów degradacji:

• Pocienia o charakterze ogólnym i lokalnym	D_{f-gov}^{thin}
• Uszkodzenia wykładzin komponentu	D_{f-gov}^{elin}
• Uszkodzenia zewnętrzne (pocienia i pęknięcia)	D_{f-gov}^{extd}
• Naprężeniowe pęknięcie korozyjne (Stress Corrosion Cracking)	D_{f-gov}^{scc}
• Wysokotemperaturowy atak wodorowy (High Temperature Hydrogen Attack (HTHA))	D_{f-gov}^{htha}
• Krucho pęknięcie (Brittle Fracture)	D_{f-gov}^{brit}
• Zmęczenie mechaniczne elementów rurociągów (Mechanical Fatigue)	D_{f-gov}^{mfat}

W sytuacji, gdy aktywny jest więcej niż jeden mechanizm degradacji, współczynnik uszkodzeń obliczany jest dla każdego mechanizmu i następnie sumowany w celu określenia całkowitego ($Df(t)$) dla komponentu, zgodnie z poniższymi zasadami. Na rysunku nr 1 przedstawiono zasady wyznaczania współczynnika ($Df(t)$) dla więcej niż jednego mechanizmu degradacji, tym samym określenia prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń $POF(t)$ wynikających z aktywności tych mechanizmów degradacji.



Rysunek nr 1. Zasada określenia prawdopodobieństwa uszkodzenia dla kilku mechanizmów degradacji

Współczynnik uszkodzenia dla komponentu, który służy do obliczenia prawdopodobieństwa, jest jak widać z zależności (4), sumą składowych współczynników dla mechanizmów degradacji i oznaczany jest jako $D_{f-total}$.

Istotą oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia jest wnikliwa analiza aktywności mechanizmów degradacji, które mogą przyczynić się do pogorszenia stanu technicznego komponentów urządzenia.

Poniżej pokazano ogólne zasady wyznaczania współczynnika uszkodzeń uwzględniającego wpływ oddziaływania aktywnych mechanizmów degradacji na prawdopodobieństwo uszkodzenia urządzenia.

$$D_{f-total} = D_{f-gov}^{thin} + D_{f-gov}^{extd} + D_{f-gov}^{scc} + D_f^{hiha} + D_{f-gov}^{brit} + D_f^{mfat} \quad (4)$$

Pocienia wewnątrz Uszkodzenia zewnętrzne

$$D_f^{thin} = \max \left[\left(\frac{D_{fB}^{thin} \cdot F_{IP} \cdot F_{DL} \cdot F_{WD} \cdot F_{AM} \cdot F_{SM}}{F_{OM}} \right), 0.1 \right]$$

- Korozja spowodowana przez kwas solny
- Korozja spowodowana obecnością siarki i kwasów naftenowych
- Korozja wysokotemperaturowa w atmosferze H₂/H₂S
- Korozja spowodowana przez kwas siarkowy
- Korozja spowodowana przez kwas fluorowodorowy
- Korozja spowodowana wodorosiarczkiem amonu
- Korozja aminowa
- Wysokotemperaturowe utlenianie
- Korozja spowodowana przez kwaśną wodę
- Korozja spowodowana przez wodę chłodzącą
- Korozja ziemna
- Korozja spowodowana dwutlenkiem węgla
- Korozja den atmosferycznych zbiorników magazynowych

W modelu uwzględnia się również modyfikatory zwiększające lub zmniejszające przewidywaną wartość współczynnika:

F_{OM} – współczynnik uwzględniający skuteczność systemu monitoringu korozji, jeśli zastosowano

F_{IP} – dla obszarów, gdzie następuje mieszanie czynników (mix point), obszarów wtłoku chemikaliów lub wody (injection point)

F_{DL} – dla elementów rurociągów, w których stale lub okresowo występuje brak przepływu i związana z tym większa prędkość korozji (deadleg)

Współczynniki dedykowane dla atmosferycznych zbiorników magazynowych:

F_{WD} – współczynnik uwzględniający występowanie złączy spawanych

F_{AM} – współczynnik uwzględniający efektywność utrzymania ruchu zbiornika wg standardu API STD 653

F_{SM} – współczynnik uwzględniający wpływ osiadania zbiornika

W przypadku, gdy urządzenie wyposażone jest w wykładzinę wewnętrzną zabezpieczającą materiał konstrukcyjny przed oddziaływaniem mechanizmów degradacji współczynnik uszkodzenia ze względu na pocienia możemy zredukować, zgodnie z zależnością:

$$\text{gdzie: } D_{f-gov}^{hin} = \min \left[D_f^{hin}, D_f^{elin} \right]$$

$$D_f^{elin} = D_{fB}^{elin} \cdot F_{LC} \cdot F_{OM}$$

W tym przypadku F_{LC} jest współczynnikiem uwzględniającym kondycję wykładziny, a F_{OM} współczynnikiem uwzględniającym skuteczność systemu monitoringu szczelności wykładziny.

Uszkodzenia zewnętrzne

$$D_{f-gov}^{extd} = \max \left[D_f^{extf}, D_f^{CUIF}, D_f^{ext-CLSCC}, D_f^{CUI-CLSCC} \right]$$

Stale ferrytyczne

- Korozja atmosferyczna elementów niezolowanych
- Korozja pod izolacją

Stale austenityczne

- Pęknięcie naprężeniowe chlorkowe elementów izolowanych i niezolowanych

Kruche pęknięcie

$$D_{f-gov}^{brit} = \max \left[\left(D_f^{brit} + D_f^{tempe} \right), D_f^{885F}, D_f^{sigma} \right]$$

- Kruche pęknięcie (Brittle Fracture)
- Kruchość z powodu starzenia wysokotemperaturowego (Temper Embrittlement)
- Kruchość w temperaturze 474°C (885°F Embrittlement)
- Kruchość fazy Sigma i Chi (Sigma Phase Embrittlement)

Naprężeniowe pęknięcie korozyjne

$$D_{scc} = \max \left[\frac{D_f^{caustic}, D_f^{amine}, D_f^{scc}, D_f^{HIC/SOHIC-H_2S}, D_f^{ACSCC}}{D_f^{PASCC}, D_f^{CLSCC}, D_f^{HSC-HF}, D_f^{HIC/SOHIC}} \right]$$

- Pęknięcie naprężeniowe kaustyczne (Caustic Stress Corrosion Cracking (Caustic Embrittlement))
- Pęknięcie naprężeniowe aminowe (Amine Stress Corrosion Cracking)
- Pęknięcie naprężeniowe siarczkowe (Pęcherze wodorowe / Nawodornianie / Pęknięcie naprężeniowe) (Wet H₂S Damage (Blistering / HIC / SOHIC / SSC))
- Pęknięcie naprężeniowe węglanowe (Alcaline Carbonate Stress Corrosion Cracking)
- Pęknięcie naprężeniowe w środowisku kwasu wielotlionowego (Polythionic Acid Stress Corrosion Cracking (PASCC))
- Pęknięcie naprężeniowe chlorkowe (Chloride Stress Corrosion Cracking (CLSCC))

Zmęczenie mechaniczne elementów rurociągów

D_f^{mfat} Współczynnik wyznacza się uwzględniając m.in. geometrię rurociągu i sposób podłączenia odgałęzień, charakter wibracji i ilość cykli.

Wysokotemperaturowy atak wodorowy

Dotyczy elementów ze stali węglowej, C-½ Mo i stali niskostopowych Cr-Mo narażonych na wysokotemperaturowy atak wodorowy. Wartość współczynnika wyznacza się w odniesieniu do tzw. reprezentatywnych krzywych Nelsona (Representative Nelson Curve) zawartych w standardzie API RP 941, uwzględniając rodzaj materiału, temperaturę roboczą i ciśnienie parcjale wodoru.

Pokazane powyżej zależności pozwalają na wyznaczenie w sposób powtarzalny wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia analizowanego komponentu POF (T).

Należy jednak mieć na uwadze fakt, że uzyskanie właściwych danych służących do wyznaczenia cząstkowych składowych poszczególnych współczynników wymaga zaangażowania całego ZESPOŁU RBI, o którym wspomniano w pierwszym artykule dotyczącym RBI.



Istotą poprawnej i wiarygodnej analizy RBI jest zadbanie, aby wykorzystane dane do wyznaczenia współczynnika uszkodzeń opierały się na rzetelnej analizie aktywności mechanizmów degradacji oraz na zwalidowanych danych. Wymaga to wysokich kompetencji członków zespołu RBI, jak również skutecznego systemu zarządzania całym Programem RBI.

COF – KONSEKWENCJE USZKODZENIA (CONSEQUENCE OF FAILURE)

Drugim składnikiem ryzyka, które matematycznie wyraża zależność (3), są konsekwencje wynikające z rozszczelnienia (COF). W omawianej metodologii RBI konsekwencje uszkodzenia wyznacza się głównie w celu dokonania rankingu komponentów względem ich ryzyka. Następnie zależnie od wartości ryzyka ustala się, które komponenty urządzeń należy poddać inspekcji w pierwszej kolejności, tj. w jakim terminie oraz w jakim zakresie.

W odróżnieniu od prawdopodobieństwa uszkodzenia (POF) konsekwencje nie są zależne od czasu i przyjmuje się, że nie ulegają zmianie w okresie objętym analizą.

W przypadku, gdy zaistnieją okoliczności, które mogą wpłynąć na wielkość konsekwencji, niezbędne jest przeprowadzenie walidacji analizy RBI i ponowne wyznaczenie ryzyka z uwzględnieniem zmian.

W standardzie API RP 581 zawierającym algorytm wyliczenia konsekwencji proces ten możemy przeprowadzić na dwóch poziomach:
Level 1 - pozwala na wykonanie obliczeń dla zdefiniowanych reprezentatywnych substancji,
Level 2 - pozwala na obliczenie konsekwencji zasadniczo dla dowolnej substancji, po zdefiniowaniu wymaganych parametrów.

W podejściu stosowanym przez Urząd Dozoru Technicznego wymagane jest wyznaczenie konsekwencji na poziomie Level 2.

Konsekwencje w RBI możemy wyrazić w dwóch jednostkach:

- jako powierzchnię narażoną na konsekwencje, wyrażoną najczęściej w [m²],
- w jednostkach monetarnych, uwzględniających zdefiniowane grupy kosztów poniesionych w wyniku wystąpienia potencjalnych konsekwencji.

Standard API RP 581 zawiera również oddzielny algorytm dla wyznaczenia konsekwencji uszkodzenia atmosferycznych zbiorników magazynowych, w którym konsekwencje wyrażone są tylko w jednostkach monetarnych.

SKUTECZNOŚĆ RBI

Podsumowując tę część, należy wspomnieć jeszcze o dwóch istotnych kwestiach dotyczących skuteczności procesu RBI, którymi są: oprogramowanie stosowane do prowadzenia obliczeń ryzyka oraz kompetencje personelu, który je przeprowadza.

Oprogramowanie

Odnosząc się do pierwszej z nich, skuteczne prowadzenie obliczeń ryzyka w RBI wymaga stosowania dedykowanego oprogramowania. W przypadku gdy RBI ma być wykorzystywane do planowania inspekcji urządzeń podlegających dozorowi technicznemu, wybór oprogramowania musi być uzgodniony z UDT, ponieważ model obliczeniowy powinien być zgodny ze standardem API RP 581. Oczywiście, obliczenia stosowane w RBI mogą być wykonane ręcznie, jednakże nie zapewniałyby to wystarczającej dynamiki obliczeń i byłoby nieskutecznym narzędziem do zarządzania ryzykiem.

Personel

Drugą istotną kwestią jest konieczność zapewnienia odpowiednich kompetencji personelu, który wykonuje obliczenia ryzyka. Niedobór wiedzy w zakresie metodologii prowadzenia obliczeń może skutkować pominięciem istotnych z punktu widzenia obliczeń elementów, ponieważ wynik uzyskany z obliczeń zależy głównie od danych wejściowych, które analityk ryzyka wykonujący obliczenia ma obowiązek zwalidować. **Niezrozumienie ryzyka, czyli czynników, które wpływają na jego wartość, jest podstawowym i niedopuszczalnym błędem w stosowaniu RBI.** Sytuacja, w której na postawione pytanie: „Dlaczego należy wykonać taki zakres badań?” pada odpowiedź: „Tak wyszło z obliczeń” lub „Program policzył”, może być objawem, że nie zrozumiano czynników wpływających na wartość ryzyka.

Istotą RBI jest praca zespołu ekspertów, których zadaniem jest obiektywna ocena zebranych i wiarygodnych danych w celu zrozumienia czynników wpływających na ryzyko i wykonanie obliczeń, pokazujących jego wartość. **Na tej podstawie można uzyskać odpowiedzi na pytania: kiedy, w jakim zakresie i jakimi metodami wykonać inspekcje urządzeń, aby były one skuteczne do utrzymania ryzyka na akceptowalnym poziomie.**

W kolejnej części, do której przeczytania już teraz zapraszam, przybliżę zasady wyznaczania konsekwencji stosowane w metodologii RBI.

Literatura:

- [1] PN-ISO 31000, Zarządzanie ryzykiem Zasady i wytyczne, marzec 2012.
- [2] API RP 580 Risk-based Inspection, third edition, February 2016.
- [3] API RP 581 Risk-based Inspection Methodology, third edition, April 2016.
- [4] WARUNKI URZĘDU DOZORU TECHNICZNEGO WUDT-RBI-2017 Planowanie inspekcji urządzeń ciśnieniowych w oparciu o analizę ryzyka RBI (Risk Based Inspection), wydanie 03.2017.
- [5] API RP 581 Risk-based Inspection Methodology, third edition, April 2016.