



XXIV

XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009

awarie budowlane

Dr hab. inż. JANUSZ NICZYJ, *niczyj@ps.pl*

Katedra Teorii Konstrukcji, Politechnika Szczecińska

Mgr inż. KRZYSZTOF CHŁAPOWSKI, *krzysztof.chlapowski@wp.pl*

Przed. Bud.-Mont. „SCANBET” Chociwel, Biuro Projektów Szczecin

ANALIZA STANU ISTNIEJĄCEGO KOMINA STALOWEGO A OPTYMALNE KOSZTY UŻYTKOWANIA

ANALYSIS OF SERVICEABILITY OF EXISTING STEEL CHIMNEY BY LIFETIME MAINTENANCE COST

Streszczenie W pracy przedstawiono analizę stanu nośności istniejących konstrukcji z odniesieniem się do ich niezawodności i kosztów użytkowania. Wyznaczenie inspekcji konstrukcji związane z zastosowaniem teorii niezawodności. Metoda pozwala na przyjęcie planu inspekcji optymalizującego koszty ogólne i utrzymanie niezawodności użytkowanej konstrukcji na akceptowalnym poziomie. Inspekcje są ważną częścią procesu zarządzania jako monitoringu konstrukcji.

Abstract This paper presents application of reliability-based techniques for inspection of existing structures. An optimal reliability-based inspection program is the key to optimize the lifetime maintenance cost while maintaining the safety and serviceability of structures at acceptable levels. Inspections form an important part of the integrity management process as a means of monitoring the performance of structures. The methods were used for developing inspection plans for steel chimney structure.

1. Wstęp

Przeprowadzenie inspekcji jest ważną częścią procesu zarządzania jako element monitoringu eksploatowanej konstrukcji w celu zapewnienia jej bezpieczeństwa i użyteczności. Istniejące konstrukcje inżynierskie powinny być monitorowane podczas całego ich czasu użytkowania. W czasie dokonywanych przeglądów należy rozróżnić naprawy czy wymiany uszkodzonych elementów, dokładną inspekcję części zasadniczej konstrukcji od przyjęcia takich działań, które pozwolą utrzymać założone bezpieczeństwo użytkowania układu. Można to sprowadzić do strategii typu: *Przegląd, Naprawa, Utrzymanie*.

W utrzymaniu stanu użytkowania konstrukcji przedziały czasowe pomiędzy wykonywanymi naprawami i pracami konserwacyjnymi mają istotne znaczenie na jej prawdopodobieństwo awarii. Celem analizy optymalizacyjnej jest wyznaczenie minimalnych kosztów z tym związanych.

Wyniki nieniszczących inspekcji, wykonane w optymalnych przedziałach czasowych, mają wpływ na podejmowane decyzje w celu utrzymania stanu użytkowania i zmniejszenie ryzyka awarii konstrukcji. Otrzymane informacje z inspekcji pozwalają oszacować niezawodność konstrukcji dla założonego czasu użytkowania. Podstawą planowania napraw jest wyrównywanie narastającego ryzyka awarii do przyjętego dopuszczalnego współczynnika bezpie-

czeństwa konstrukcji. W ostatnich latach nastąpił istotny rozwój w dziedzinie niezawodnościowego planowania inspekcji (*reliability-based inspection – RBI*) złożonych konstrukcji, jak np. platformy wiertnicze [1] i mosty [2]. *RBI* stosuje jakościowe i ilościowe metody do określenia analizy stanów użytkowania i odpowiednio przeprowadzanych inspekcji. Program optymalnego niezawodnościowego przeglądu jest elementem podstawowym do optymalizacji kosztów utrzymania stanu użytkowania konstrukcji na akceptowanym poziomie. Do analizy niezawodnościowej elementów konstrukcji i wniosków wynikających z inspekcji stosowane są i rozwijane różne narzędzia i metody. Większość z nich oparta jest na prawdopodobieństwie wykrycia uszkodzeń (*probabilisty of detection PoD*), prawdopodobieństwie awarii (P_f), teorią Bayesa itp.

Na podjęcie decyzji o przeprowadzeniu napraw istniejących konstrukcji po przeprowadzonych inspekcjach bardzo duży wpływ mają koszty wykonania prac i wpływ tych prac na zwiększenie bezpieczeństwa konstrukcji. Przy liniowo lub nieliniowo zmieniającym się współczynnikiem niezawodności β w czasie można przyjąć, że koszty całkowite są sumą kosztów początkowych, kosztów inspekcji i kosztów związanych z poprawą niezawodności. Związane one są także z bankowymi stopami dyskontowymi. Tworzone są różne scenariusze utrzymania stanu użytkowania konstrukcji związane ze zwiększaniem wartości współczynnika niezawodności. Analiza optymalizacyjna pozwala wybrać scenariusz działań w czasie użytkowania konstrukcji, w którym poniesione oczekiwane koszty ogólne będą najmniejsze i dadzą optymalne wartości zmiennych decyzyjnych problemu.

2. Sformułowanie problemu optymalizacji

Zmienne decyzyjne, definiujące strategię inspekcji, związane są z liczbą inspekcji N w oczekiwanym czasie użytkowania T_K , przedziałach czasowych pomiędzy kolejnymi inspekcjami $\Delta \mathbf{T} = (\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_N)$, $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$. Zmienne te tworzą wektor inspekcji $\mathbf{i} = (N, \Delta \mathbf{T})$. Zmienne mające wpływ na niezawodność konstrukcji tworzą wektor \mathbf{p} . Problem optymalizacji dla konstrukcji formułujemy jako minimalizacja kosztów całkowitych $K(\mathbf{i}, \mathbf{p})$ w postaci warunku [3]:

$$\min K(T_K, \mathbf{i}, \mathbf{p}) = K_p + K_{in}(\mathbf{i}) + K_n(\mathbf{i}, \mathbf{p}) + K_{nb} + K_a(\mathbf{i}, \mathbf{p}), \quad (1)$$

przy spełnieniu ograniczeń

$$\begin{aligned} K(T_K, \mathbf{i}, \mathbf{p}) &\leq K_{inw}, \\ \beta(\mathbf{i}, \mathbf{p}) &\geq \beta_d, \\ p_i^d &\leq p_i \leq p_i^g, \quad i = 1, \dots, I. \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: K – oczekiwane koszty całkowite w czasie użytkowania konstrukcji, K_p – koszty początkowe, K_n – koszty napraw, K_{nb} – koszty napraw okresowych (planowanych), K_a – koszty awarii, K_{in} – koszty inspekcji, K_{inw} – maksymalne zaplanowane koszty, β – współczynnik niezawodności konstrukcji, β_d – założona dolna granica współczynnika niezawodności, p_i^d i p_i^g – dolne i górne wartości parametrów p_i , I – liczba parametrów projektowych konstrukcji.

Współczynnik niezawodności $\beta(t)$ zdefiniowany jest następująco:

$$\beta(t) = -\Phi^{-1}(P_f(t)), \quad (3)$$

gdzie: Φ^1 jest funkcją odwrotną do dystrybuanty standaryzowanej normalnej zmiennej losowej, a $P_f(t)$ prawdopodobieństwo awarii w czasie t .

3. Modelowanie oczekiwanych kosztów

Funkcja oczekiwanych kosztów może być zamodelowana jako funkcja zmiennych decyzyjnych, określonych w równaniu (1). Przewidywane koszty inspekcji $K_{in}(\mathbf{i})$ można zdefiniować następująco:

$$K_{in}(\mathbf{i}) = \sum_{i=1}^N K_{in(i)}(q) \frac{1}{(1+r)^{T_i}}, \quad (4)$$

gdzie: $K_{in(i)}(q)$ – koszty i -tej inspekcji w zależności od przyjętej metody q , T_i jest czasem w latach i -tej inspekcji, r – stopa dyskontowa.

Koszty napraw K_n :

$$K_n(\mathbf{i}, \mathbf{p}) = \sum_{i=1}^N K_r P_{R(i)} \frac{1}{(1+r)^{T_i}}, \quad (5)$$

gdzie: K_r – koszty napraw, $P_{R(i)}$ – prawdopodobieństwo wykonania napraw w i -tej inspekcji, gdy uszkodzenie nie wystąpiło wcześniej.

Przewidywane koszty awarii K_a :

$$K_a(\mathbf{i}, \mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N+1} K_{aw(i)} \left(P_f(T_i) - P_f(T_{i-1}) \right) \frac{1}{(1+r)^{T_i}}, \quad (6)$$

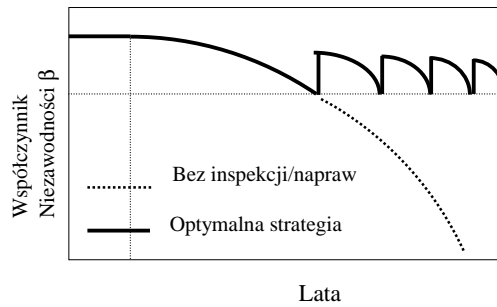
gdzie: K_{aw} – jest kosztem awarii, $P_f(T_i)$ – prawdopodobieństwo awarii w czasie T_i .

Działania naprawcze związane są z czasem użytkowania, a także z efektem wpływu zmian finansowych w czasie. We wszystkich wzorach ten sam mnożnik związany jest ze zmianą bankowej stopy dyskontowej.

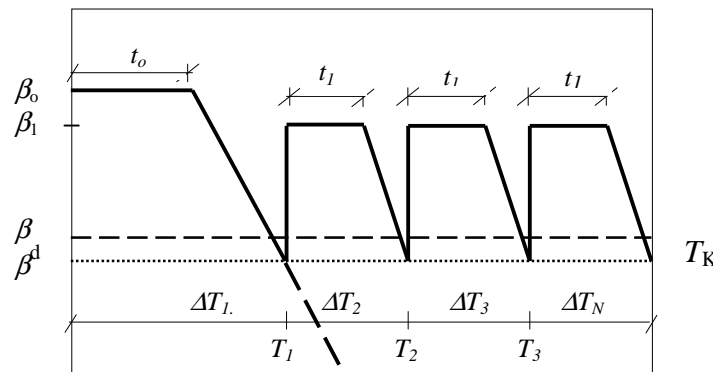
4. Model utrzymania niezawodności konstrukcji

W przypadku analizy stanu konstrukcji, z uwzględnieniem niezawodności, koszty są różne dla nowych i istniejących konstrukcji. Metody związane z określeniem kosztów napraw wynikają z utrzymania różnych poziomów niezawodności konstrukcji [4]. Plan napraw, wynikający z ekonomicznego punktu widzenia, polega na określeniu optymalnych parametrów kosztów aby był spełniony minimalny dopuszczalny poziom niezawodności układu. Na rys. 1. przedstawiono jeden ze scenariuszy utrzymania stanu użytkowania konstrukcji w przypadku dokonywanych przeglądów i związanych z tym napraw zwiększających wartość współczynnika niezawodności. Współczynnik niezawodności zależy od czasu użytkowania konstrukcji. Zależny może on być od wielu zmiennych, jak np.: czasu wykonania pierwszych prac naprawczych, czasu pogarszania się stanu konstrukcji (szybkość procesu korozji stali lub betonu). Czas wykonania prac naprawczych zależy przede wszystkim od momentu wykonania pierwszych prac podnoszących bezpieczeństwo i przedziału czasowego pomiędzy następnymi krokami naprawczymi. Jednym

z podstawowych kryteriów przeprowadzanych inspekcji jest utrzymanie minimalnego poziomu założonej niezawodności. Kiedy krzywa współczynnika niezawodności zbliży się do założonej dopuszczalnej niezawodności zalecana jest następna dokładna inspekcja stanu konstrukcji. Przyjęty model zmian współczynnika bezpieczeństwa konstrukcji w czasie jej użytkowania przedstawiono na rys. 2. Określono w nim założoną dolną granicę współczynnika niezawodności β^d , której osiągnięcie daje informację o konieczności dokonania inspekcji i przeprowadzenia napraw lub wzmocnień konstrukcji. Założono utrzymanie niezawodności na poziomie β_1 w cyklach czasowych t_1 przez cały założony czas użytkowania T_K .



Rys. 1. Strategie dla inspekcji związanych z niezawodnością



Rys. 2. Przyjęty scenariusz zmian niezawodności w czasie użytkowania konstrukcji

Równanie współczynnika niezawodności konstrukcji bez dokonywanych napraw ma postać:

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_0, & \text{dla } t \leq t_0, \\ \beta_0 - \alpha_0(t - t_0), & \text{dla } t > t_0, \end{cases} \quad (7)$$

gdzie: β_0 – wartość współczynnika niezawodności dla $t=0$, t_0 – czas utrzymania początkowego współczynnika niezawodności β_0 , natomiast α_0 – stopień utrzymania współczynnika niezawodności.

Po dokonaniu pierwszej inspekcji po czasie T_1 , została dokonana naprawa i równanie dla kształtu współczynnika niezawodności ma wówczas postać:

$$\beta(t) = \begin{cases} \beta_1, & \text{dla } T_1 \leq t \leq T_1 + t_1, \\ \beta_1 - \alpha_1(t - T_1 - t_1), & \text{dla } T_1 + t_1 < t < T_1 + \Delta T_2. \end{cases} \quad (8)$$

Prawdopodobieństwo awarii w czasie t do pierwszej inspekcji (T_1), $0 \leq t \leq T_1$, można zdefiniować następująco:

$$P_f(t) = P(M(t) \leq 0) \quad (9)$$

gdzie: $M(t)$ – margines bezpieczeństwa, modelujący awarie w czasie t , związany z warunkami granicznymi nośności.

W przedziale czasowym pomiędzy pierwszą i drugą inspekcją $T_1 < t \leq T_2$, prawdopodobieństwo awarii jest równe [5]

$$P_f(t) = P_f(T_1) + P(M(T_1) > 0 \cap M_{nap}(T_1) > 0 \cap M^0(t) \leq 0) + \\ + P(M(T_1) > 0 \cap M_{nap}(T_1) \leq 0 \cap M_{nap}^1(t) \leq 0) \quad (10)$$

gdzie: $M_{nap}(T_1)$ – margines bezpieczeństwa zdarzenia po wykonanych naprawach w czasie T_1 , $M^0(t)$ i $M^1(t)$ – marginesy bezpieczeństwa modelujące awarie w czasie $t > T_1$, odpowiednio gdy nie wykonywano napraw i wykonanych napraw w czasie pierwszej inspekcji.

Istotny jest wybór terminów optymalnych inspekcji i kalendarza napraw przed końcem wymaganego czasu użytkowania T_K . Optymalny czas inspekcji jest otrzymywany np. poprzez minimalizację maksymalnego prawdopodobieństwa awarii w przedziale czasowym (t, T_1) i w przedziale czasowym (T_1, T_2) .

5. Analiza stanu komina stalowego

W analizie rozpatrzono komin stalowy o średnicy wewnętrznej 1,9 m, grubości płaszcza równej 12 mm i wysokości 70 m oddany do eksploatacji w 1978 r. Komin stalowy wymaga prowadzenia systematycznej konserwacji i ciągłej kontroli stanu technicznego. Zagrożenie bezpieczeństwa w konstrukcjach stalowych wynika głównie ze stanu zawansowania procesów korozyjnych. Miarą działania korozji jest prognozowany średni ubytek grubości Δt w *mm/rok*, elementów komina stykających się z gazami. Pomiaru nieniszczące (ultradźwiękowe) rozkładu grubości ścianek komina wykonane w czasie inspekcji wykazały maksymalną szybkość korozji przy wierzchołku komina – 0,50 mm/rok. Lokalne ekstremum korozji – 0,30 mm/rok występuję na poziomie 28 m. W Tab.1 pokazano uzyskane z pomiarów w czasie inspekcji ubytki korozyjne grubości ścianek płaszcza komina.

Dla kominów o wysokości $H = 45$ m i średnicy $D = 1,10$ m których okres eksploatacji wynosił od 9 do 18 lat, badanych w przedziałach czasowych od 2 do 4 lat, szybkość korozji rocznej na wysokości 35 m wynosiła od 0,07 do 0,27 *mm/rok* [6]. Przedstawione wyniki przez Wichtowskiego [7] dla 12 kominów stalowych o wysokości $H < 70$ m pokazują średni ubytek korozji dla całego trzonu równy 0,18 *mm/rok*. W pracy [8] autorzy na podstawie pomiarów 140 kominów pokazują średni ubytek korozyjny całego trzonu dla kominów o wysokości $H \leq 30$ m równy 0,26 *mm/rok*, dla $30 < H \leq 50$ m – 0,31 *mm/rok* i dla $50 < H \leq 80$ m – 0,33 *mm/rok*. Ogółem dla kominów $H \leq 80$ m – 0,30 *mm/rok*.

W rozumieniu Prawa budowlanego, art.61, pkt.1, kominy w czasie użytkowania powinny być poddawane przez użytkownika m.in. okresowej kontroli, co najmniej raz na 5 lat, polegającej na sprawdzeniu stanu sprawności technicznej i wartości użytkowej. Norma [9] wymaga natomiast aby kontrolę stanu technicznego przewodu komina przeprowadzać raz w roku, szczegółową po 4 latach użytkowania, a następnie w terminach ustalonych w wytycznych pokontrolnych. W opracowywanych zaleceniach należy m.in. podać przewidywany okres

eksploatacji komina po wykonaniu prac wzmacniających i naprawczych. Wyjściowym parametrem inspekcji jest pomiarzenie grubości ścianki. Badania grubości ścianek trzonu komina są jednymi z podstawowych badań przeprowadzanych metodami nieniszczącymi.

Miarą działania korozji jest prognozowany średni ubytek grubości Δt w mm/rok , elementów komina stykających się z gazami. Zmniejszenie wytrzymałości obliczeniowej stali wyznacza się przez zastosowanie współczynnika α_{kor} określonego wzorem

$$\alpha_{kor} = \frac{1}{1 + 0,04 t_e \Delta t}, \quad (11)$$

gdzie: t_e – planowany czas użytkowania komina, *lata*; Δt – ubytek korozyjny grubości ścianki, mm/rok . W obliczaniu $\Delta t = t - t_{kor}$, gdzie: t – nominalna grubość ścianki przewodu kominowego, mm ; t_{kor} – pomierzona grubość ścianki przewodu kominowego, mm .

Margines bezpieczeństwa stanu granicznego nośności przekroju przewodu kominowego stalowego z trzonem rurowym obciążonego siłą osiową N i momentem zginającym M ma postać [9]

$$M(t) = \left(\frac{N}{\varphi N_{RC}} + \frac{M}{M_R} \right) - 1, \quad (12)$$

w którym: φ – współczynnik stateczności ogólnej, N_{RC} – nośność obliczeniowa przekroju przy osiowym ściskaniu, M_R – nośność obliczeniowa przekroju przy zginaniu.

Współczynnik niezawodności

$$\beta = \frac{R^0 - S^0}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad (13)$$

przy przyjęciu rozkładów normalnych niezależnych zmiennych obciążenia (S) i wytrzymałości (R) dla trzonu komina będzie miał postać

$$\beta = \frac{\varphi_p \alpha_{kor} f_{dT}^0 - \left(\frac{N^0}{\varphi A} + 1,2 \frac{M^0}{W} \right)}{\sqrt{\sigma_f^2 + \left(\frac{1}{\varphi A} \right)^2 \sigma_N^2 + \left(\frac{1}{1,2 W} \right)^2 \sigma_M^2}}, \quad (14)$$

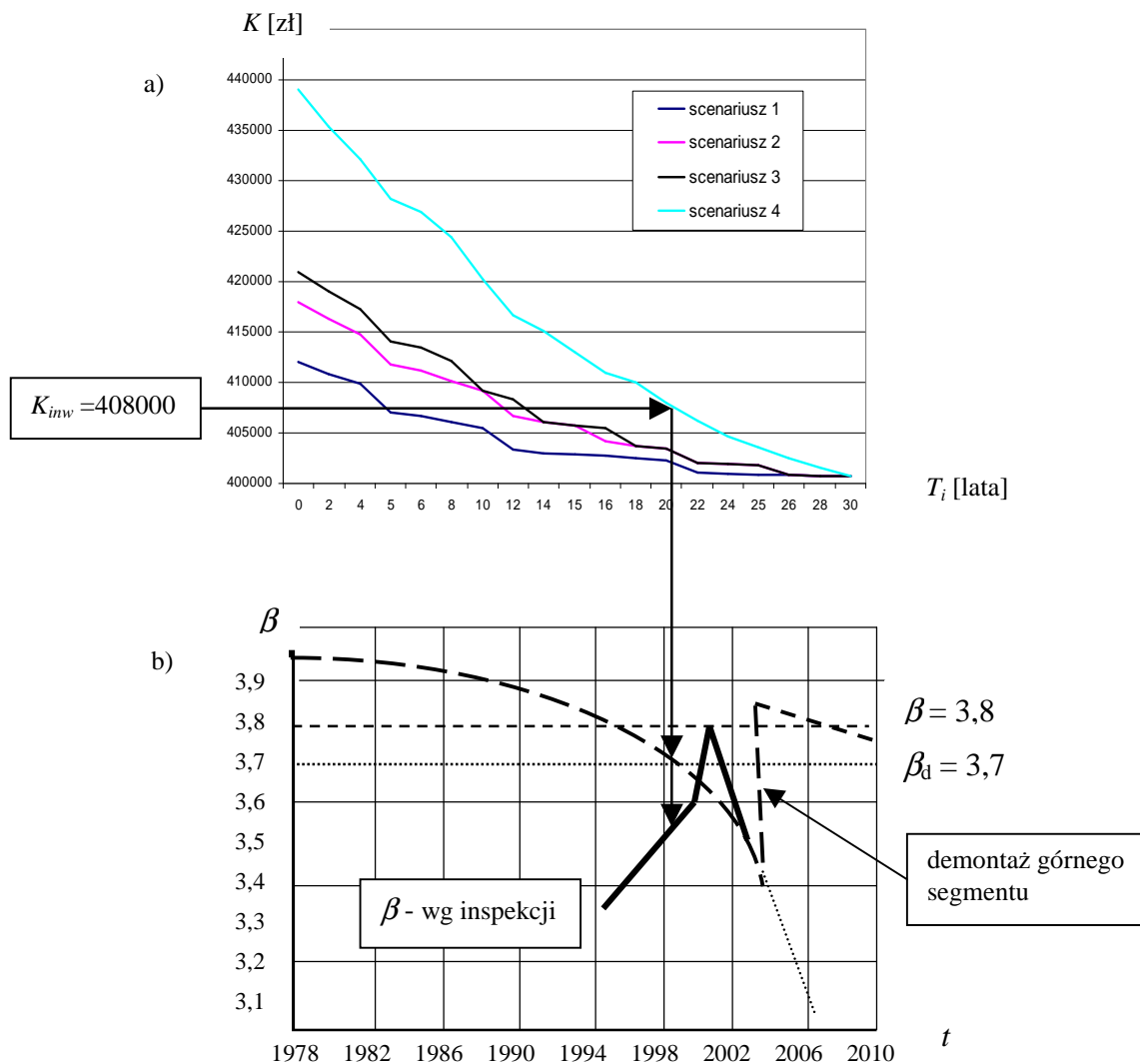
gdzie: f_{dT}^0 , σ_f – wartość oczekiwana i odchylenie standardowe wytrzymałości obliczeniowej stali; N^0 , σ_N – wartość oczekiwana i odchylenie standardowe siły podłużnej w przekroju; M^0 , σ_M – wartość oczekiwana i odchylenie standardowe momentu zginającego w przekroju poprzecznym komina. Przyjęto 15% współczynnik zmienności dla zmiennych losowych.

Tablica 1. Charakterystyka przeprowadzanych inspekcji

Rok inspekcji	Lata eksploatacji	t_e [lata]	Δt [mm/rok]	α_{kor}	β	Obliczona nośność insp. norma		Zalecenia (następna inspekcja, prace remontowe)
1995	16	9	0,200	0,936	3,329	0,470	0,433	1997
2000	21	3	0,260	0,979	3,619	0,416	0,568	2001
2001	22	3	0,330	0,982	3,793	0,393	0,593	2002/03 ocieplenie kołnierzy łączących segmenty
2003	24	3	0,300	0,982	3,499	0,454	0,647	2004 demontaż górnego 10 m segmentu

Tablica 2. Plan inspekcji

Scenariusz	Lata eksploatacji, czas inspekcji T_i														
	4	8	10	12	14	15	16	18	20	22	24	25	26	28	30
Scenariusz 1	TAK		TAK						TAK						TAK
Scenariusz 2	TAK		TAK			TAK			TAK			TAK			TAK
Scenariusz 3	TAK	TAK		TAK			TAK		TAK			TAK			TAK
Scenariusz 4	TAK	TAK	TAK		TAK	TAK		TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK



Rys. 3. Wykresy kosztów całkowitych (a) i współczynnika niezawodności (b)

Obliczone wg wzoru (14) wartości współczynnika niezawodności przy przyjęciu pomierzonych ubytków korozyjnych przedstawiono w tab.1 i na rys.3.

Koszty początkowe przyjęto równe $K_p = 380$ tys. zł, koszty inspekcji $K_{in(i)} = 3$ tys. zł, koszty napraw bieżących $K_{nb} = 5\div 20$ tys. zł, stałą stopę dyskontową równą $r = 5\%$, współczynnik niezawodności $\beta = 3.8$, a założoną dolną granicę określającą konsekwencje awarii konstrukcji jako poważne z prawdopodobieństwem awarii $P_f = 1.1 \times 10^{-5} - \beta_d = 3.7$, założony początkowy oczekiwany czas użytkowania $T_K = 30$ lat. Teoretyczny margines bezpieczeństwa $M(t)$ obliczono z uwzględnieniem wpływu stopnia korozji równego $\Delta t = 0,30$ mm/rok na charakterystykę geometryczną przekroju komina i cechy mechaniczne stali.

Zgodnie z zależnością (1) koszty całkowite są równe:

$$\min K(i) = K_p + K_{nb} + \sum_{i=1}^N K_{in(i)}(q) \frac{1}{(1+r)^{T_i}} = 400000 + \sum_{i=1}^N 3000 \frac{1}{(1+0.05)^{T_i}}, \quad (15)$$

W przypadku kosztów inwestycji do analizy związanej z terminami inspekcji przyjęto cztery scenariusze (plany) terminów, Tab.2. Uzyskane krzywe kosztów całkowitych przedstawiono na rys.3.

6. Uwagi końcowe

Przedstawiona metoda pozwala dla konstrukcji przeprowadzić analizę optymalizacyjną w celu wyznaczenia co jaki przedział czasowy, ile inspekcji i jakimi kosztami można przedłużyć stan użytkowania konstrukcji. Jako funkcje celu przyjęto minimalizację kosztów użytkowania, inspekcji, napraw i awarii konstrukcji. Zagrożenie bezpieczeństwa wynika ze stanu zawansowania głównie procesów korozyjnych. W przypadku konstrukcji budowlanych są to korozje betonu i stali. Inwestor po pewnym czasie użytkowania obiektu będzie miał możliwość dzięki proponowanej analizie kosztów i współczynnika bezpieczeństwa ocenić co bardziej się opłaci:

- czy podtrzymywać użytkowanie obiektu znacznymi środkami finansowymi,
- czy może budowa nowego obiektu.

Inspekcja przeprowadzona w roku 2003 i przeprowadzone obliczenia współczynnika niezawodności stanu istniejącego komina $\beta = 3,499 < \beta_d = 3,7$ (tab.1) pokazały potrzebę dokonania zmian konstrukcyjnych. Została podjęta decyzja o demontażu górnego 10 m segmentu. W 2008 r. po analizie czasu dotychczasowego użytkowania i stanu komina została podjęta decyzja o demontażu trzonu głównego komina i zamontowanie nowego o wysokości 50 m i średnicy 1,0 m na przełomie 2009/2010 r. Przewidywany koszt wymiany 400 tys. zł.

Literatura

1. Onoufriou T.: Reliability based inspection planning for offshore structures. J. Marine Struct. 1999, Vol.12, No.7/8, pp.521–539.
2. Onoufriou T., Frangopol D.M.: Reliability-based inspection optimization of complex structures: a brief retrospective. Computers and Structures. 2002, Vol. 80, pp.1133–1144.
3. Neves L.C., Frangopol D.M.: Condition, safety and cost for deteriorating structures with emphasis on bridges. Reliability Engineering and System Safety. 2005, Vol. 89, p.185–198.
4. Garbatov Y., Soares C.G.: Cost and reliability based strategies for fatigue maintenance planning of floating structures. Reliability Engineering and System Safety. 2001, Vol.73, pp. 293–301.
5. Rouha A., Schoefs F.: Probabilistic modelling of inspection results for offshore structures. Structural Safety, 2003, Vol.25, pp.379–399.
6. Jasiński W., Wichtowski B.: Korozja kominów stalowych z trójnogiem. Materiały „29 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących”, Krynica 2000 r.
7. Wichtowski B.: Wnioski z badań nieniszczących kominów stalowych. Materiały „28 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących”, Zakopane 1999 r.
8. Runkiewicz L., Midak J.: Ocena ubytków korozyjnych i zagrożeń eksploatacyjnych istniejących kominów stalowych. Inżynieria i Budownictwo. Nr 12/97.
9. PN-B-03201: 1993 Konstrukcje stalowe. Kominy. Obliczenia i projektowanie.