

NIEZAWODNOŚĆ STALOWEGO MOSTU KRATOWEGO

Agnieszka Dudzik, Paulina Obara, Urszula Radoń

Politechnika Świętokrzyska, Kielce

Streszczenie. Celem pracy jest analiza probabilistyczna niezawodności stalowego mostu kratowego. Parametry projektowe konstrukcji zdefiniowano jako wielkości deterministyczne oraz jako zmienne losowe. Założono, że zmienne losowe nie są skorelowane. W analizie niezawodności rozpatrywano dwa warianty opisu zmiennych losowych. W wariancie pierwszym przyjęto rozkłady normalne, a w wariancie drugim – rozkłady adekwatne do charakteru zmiennych. Transformację parametrów normalnych na parametry innego rozkładu oszacowano metodą kolokacji w punkcie centralnym. W analizowanym przypadku kryterium awarii konstrukcji zostało określone przez dwie funkcje graniczne związane odpowiednio ze stanem granicznym nośności oraz ze stanem granicznym użyteczności. W programie Mathematica utworzono moduł do obliczeń symbolicznych, wykorzystujący metodę elementów skończonych, do określenia funkcji granicznych dla różnych schematów statycznych. Funkcje te były punktem wyjścia w analizie probabilistycznej, do której użyto programu niezawodnościowego STAND. Stosując metodę FORM, wyznaczono wskaźnik niezawodności Hasofer-Linda. Dodatkowo w pracy przedstawiono wykresy wrażliwości wskaźnika niezawodności na zmienne losowe.

Słowa kluczowe: zmienne losowe, rozkład prawdopodobieństwa, metoda FORM, wskaźnik niezawodności Hasofer-Linda, wrażliwość wskaźnika niezawodności

WSTĘP

W pracy przeprowadzona została analiza niezawodności stalowego mostu kratowego. Przykład realizacji tego typu konstrukcji zilustrowano na rysunku 1. Rozpatrzono trójkątny dźwigar kratowy składający się z pasów górnego i dolnego oraz z krzyżulców, przy czym uwzględniono dwa schematy statyczne. W pierwszym przypadku (P-I) założono, że przeszła są od siebie niezależne (rys. 2a), natomiast w drugim (P-II) przyjęto, że dźwigar kratowy składa się z dwóch przeszł podpartych przegubowo (rys. 2b).

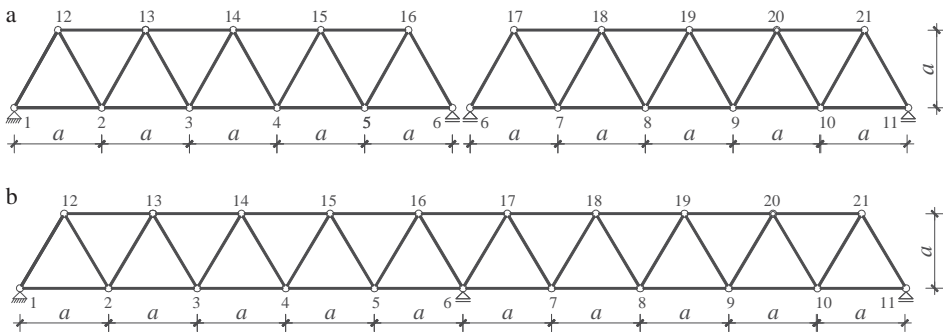
Adres do korespondencji – Corresponding author: Paulina Obara, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: paula@tu.kielce.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2015



Rys. 1. Most Osobowicki – most kolejowy na rzece Odrze m. Wrocław [www.programodra.pl]

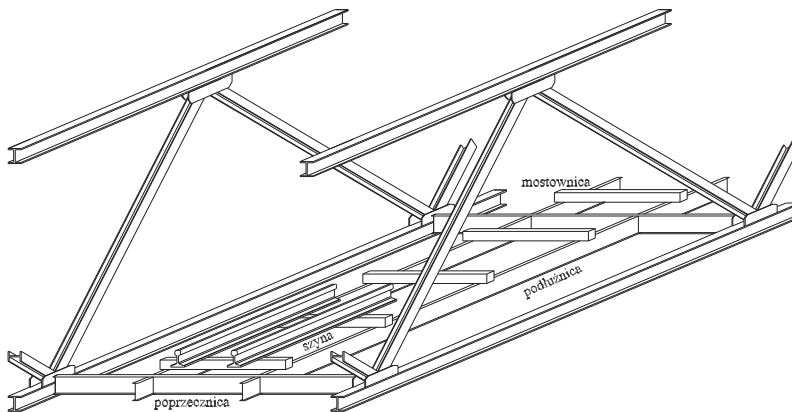
Fig. 1. The Osobowicki Bridge – railway bridge over the Odra River c. Wrocław



Rys. 2. Schemat statyczny dźwigara kratowego: a – schemat P-I, b – schemat P-II

Fig. 2. Static scheme of truss: a – scheme P-I, b – scheme P-II

W rozważaniach założono, że układ konstrukcji nośnej prześła mostu kratowego składa się z dźwigarów głównych, jezdni (podłużnic i poprzecznic), podłużnych i poprzecznych tężników oraz łożysk. Poprzecznice jezdni przymocowane są w węzłach pasa dolnego dźwigara (rys. 2 – węzły nr 1–11) w tym celu, aby zapewniały przekazywanie obciążenia pionowego bezpośrednio na węzły, dzięki czemu pręty kratownicy są rozciągane lub ściskane, niezależnie od sposobu ustawienia obciążeń pionowych w prześle. Do podłużnic jezdni przymocowuje się mostownice, na których układa się szyny toru (rys. 3).



Rys. 3. Elementy mostu kratowego

Fig. 3. Elements of truss bridge

Rozwiązania numeryczne zagadnień statyki i dynamiki mostów stalowych są obecnie dostępne w wielu systemach komputerowych analizy konstrukcji, przy czym w każdej symulacji numerycznej niezbędna jest właściwa ocena zachowań konstrukcji, dotycząca znajomości obciążeń, własności materiałowych i warunków brzegowych. W tradycyjnym projektowaniu konstrukcji wykorzystuje się deterministyczne wartości parametrów projektowych. Bezpieczeństwo konstrukcji związane ze zmiennością parametrów konstrukcyjnych zapewnia się poprzez konserwatywny dobór ich wartości i uwzględnienie w równaniach stanów granicznych współczynników bezpieczeństwa. Wykorzystanie zmiennych losowych do reprezentacji parametrów konstrukcyjnych pozwala na jawne uwzględnienie losowości w procesie projektowania. W rezultacie możliwa jest budowa modelu matematycznego, który pozwala oszacować, jakie jest prawdopodobieństwo określonego zachowania konstrukcji. Ze względu na to, że dostępne wyniki badań są na ogół niewystarczające do prowadzenia analiz probabilistycznych (abstrahując od złożoności analiz), wśród inżynierów widoczny jest opór przed stosowaniem takich metod. Dotyczy to również probabilistycznych metod numerycznych, których złożoność jest w istocie ukryta wewnątrz programów komputerowych. W tym przypadku należy dodatkowo scharakteryzować dane dwoma parametrami (wartością oczekiwaną i odchyleniem standardowym) w miejsce jednego parametru wymaganego w metodach deterministycznych. Konieczne jest więc dostarczenie inżynierom algorytmów umożliwiających oszacowanie parametrów statystycznych zmiennych występujących w analizie na podstawie podręcznych danych.

W pracy za miarę niezawodności przyjęto wskaźnik niezawodności Hasofera-Linda [Hasofer i Lind 1974], wyznaczany z wykorzystaniem iteracyjnej procedury Rackwitz-Fiesslera [Rackwitz i Fiessler 1978]. Dokładność wyników otrzymywanych przy użyciu tego wskaźnika jest wystarczająca na potrzeby praktyczne i dlatego zyskał on dużą popularność jako miara niezawodności, szczególnie w połączeniu z metodami transformacji, wykorzystującymi pełną informację o rozkładach zmiennych losowych. Jako zmienne losowe przyjęto następujące parametry modelowanych układów konstrukcyjnych: moduł Younga (E), obciążenie węzłowe (P) oraz pole przekroju poprzecznego pojedynczego elementu (A). Rozpatrzono dwie funkcje stanu granicznego: pierwsza stanowi warunek nieprzekroczenia nośności ze względu na ściskanie z uwzględnieniem wybożenia dla pojedynczego elementu konstrukcji, natomiast druga stanowi warunek nieprzekroczenia dopuszczalnych ugięć przęsła kratowego konstrukcji mostu [PN-85-S-10030].

Należy w tym miejscu podkreślić, że zagadnienia niezawodności konstrukcji nie są problemami oderwanymi od rzeczywistości. Zagadnienia te były intensywnie badane w Europie i Ameryce Północnej. Efektem aplikacyjnym tych badań są normy projektowania konstrukcji budowlanych oparte na obliczeniach półprobabilistyczną metodą stanów granicznych. Metoda ta nie jest zorientowana na wyznaczenie i kontrolę globalnych miar niezawodności. Stosując ją w obliczeniach, sprawdza się jedynie nierówność deterministyczną $g(\mathbf{X}) > 0$, przyjmując elementy wektora \mathbf{X} jako odpowiednie kwantyle. Miary niezawodności definiuje się w postaci częściowych współczynników bezpieczeństwa, stanowiących stosunki wartości kwantyli górnych zmiennych podstawowych do ich wartości charakterystycznych w przypadku obciążeń albo wartości charakterystycznych, do kwantyli dolnych w przypadku cech wytrzymałościowych. Naturalnym krokiem w kierunku lepszego opisu modelu obliczeniowego jest zastosowanie w pełni probabilistycznego sformułowania w analizie niezawodności konstrukcji budowlanych. Podejście

to umożliwia sprawdzenie nie tylko jakościowe, ale również ilościowe poziomu niezawodności konstrukcji oraz uwzględnienie rozkładów prawdopodobieństwa adekwatnych do charakteru zmiennych losowych. Autorzy niniejszej pracy zaproponowali takie oszacowanie niezawodności w odniesieniu do stalowego mostu kratowego, rezygnując tym samym z podejścia półprobabilistycznego.

WYKORZYSTANIE METODY FORM W ANALIZIE WPŁYWU PARAMETRÓW LOSOWYCH NA WARTOŚCI UGIĘĆ PRZĘSŁA MOSTU STALOWEGO

Analiza niezawodności konstrukcji polega na określeniu, jaki wpływ na stan konstrukcji ma losowa natura opisujących ją parametrów podstawowych X_1, X_2, \dots, X_n . Parametrami tymi mogą być stałe materiałowe, obciążenie czy też charakterystyki geometryczne. W pracy wielkości te zgrupowano w wektor zmiennych losowych podstawowych $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$. Realizacje $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ wektora \mathbf{X} należą do przestrzeni euklidesowej. Ocenę stanu konstrukcji umożliwia kryterium awarii – losowa funkcja graniczna $g(\mathbf{X})$. Wartości tej funkcji dzielą przestrzeń euklidesową następująco:

$$\begin{aligned} g(\mathbf{x}) \leq 0 & \text{ – obszar awarii } \Omega_f \\ g(\mathbf{x}) = 0 & \text{ – powierzchnia graniczna} \\ g(\mathbf{x}) > 0 & \text{ – obszar bezpieczny } \Omega_s \end{aligned} \quad (1)$$

Jedną z najbardziej skutecznych przybliżonych metod obliczania miar niezawodności jest metoda FORM. W przypadku ogólnym, gdy rozkład wektora \mathbf{X} zmiennych podstawowych nie jest wektorem o rozkładzie gaussowskim, stosuje się transformację sprowadzającą ten wektor do wektora gaussowskiego, którego współrzędne są niezależnymi standaryzowanymi zmiennymi normalnymi. Istnienie tego typu transformacji oraz sposób jej konstruowania pokazał po raz pierwszy Rosenblatt [1952]. Do obliczeń niezawodności adaptowali tę transformację Hohenbichler i Rackwitz [1981]. Transformacja podstawowych zmiennych losowych \mathbf{X} do gaussowskiej przestrzeni standardowej \mathbf{Z} musi zapewniać równoważność sformułowania problemu niezawodności.

Prawdopodobieństwo zniszczenia zdefiniowane w przestrzeni \mathbf{X} musi być równe prawdopodobieństwu zdefiniowanemu w przestrzeni \mathbf{Z} :

$$P_f = \int_{\Omega_f} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_{\Delta_f} \prod_{i=1}^n \varphi(z_i) dz_1 dz_2 \dots dz_n \quad (2)$$

gdzie: $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennych losowych podstawowych \mathbf{X} ,
 $\varphi(z_i)$ – łączna funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennych losowych standaryzowanych \mathbf{Z} ,

Ω_f – obszar awarii w przestrzeni \mathbf{X} ,

Δ_f – obszar awarii w przestrzeni \mathbf{Z} .

Transformację obszarów Ω_f i Δ_f można zapisać symbolicznie jako:

$$\Omega_f = \{\mathbf{x}: g(\mathbf{x}) \leq 0\} \rightarrow \Delta_f = \{\mathbf{z}: G(\mathbf{z}) \leq 0\} \quad (3)$$

gdzie: $G(\mathbf{z})$ – funkcja graniczna w gaussowskiej przestrzeni standardowej,
 $g(\mathbf{x})$ – powierzchnia graniczna, która transformuje się następująco:

$$g(\mathbf{x}) = 0 \rightarrow g[T^{-1}(\mathbf{z})] = G(\mathbf{z}) = 0, \quad \mathbf{Z} = T(\mathbf{X}) \quad (4)$$

W metodzie FORM, po transformacji zmiennych losowych \mathbf{X} do gaussowskiej przestrzeni standardowej \mathbf{Z} , aproksymuje się powierzchnię graniczną $G(\mathbf{z}) = 0$ hiperpłaszczyzną styczną do niej w punkcie projektowym \mathbf{z}^* . Hiperpłaszczyzna opisana jest równaniem:

$$l(\mathbf{Z}) = -\boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{Z} + \beta \quad (5)$$

przy czym:

$$\boldsymbol{\alpha} = - \frac{\nabla G(\mathbf{Z})}{\|\nabla G(\mathbf{Z})\|} \Bigg|_{\mathbf{z}=\mathbf{z}^*} \quad (6)$$

$$\beta = \text{sign}[l(\mathbf{0})] \delta^* \quad (7)$$

gdzie: δ^* – odległość hiperpłaszczyzny $l(\mathbf{Z}) = 0$ od początku układu współrzędnych,
 $\boldsymbol{\alpha}$ – wektor jednostkowy o kierunku przeciwnym do gradientu funkcji $G(\mathbf{Z})$ w punkcie projektowym \mathbf{z}^* .

Bardzo dużą zaletą metody FORM jest to, że umożliwia ona obliczenie wrażliwości wskaźnika niezawodności (β) na zmianę parametrów występujących w opisie zadania, praktycznie bez potrzeby dodatkowych obliczeń – wrażliwość wskaźnika β na zmianę zmiennej jest pierwszą pochodną wskaźnika β po tej zmiennej.

PRZYKŁADY NUMERYCZNE

Analizie poddano konstrukcję stalowego mostu kratowego o rozpiętości pomiędzy węzłami i wysokości $a = 4,2$ m (rys. 2). Konstrukcję zaprojektowano z profili rurowych RK $30 \times 30 \times 1,2$. Wszystkie elementy wykonano ze stali S235 o module sprężystości $E = 210$ GPa i granicy plastyczności $f_y = 235$ MPa. Konstrukcję analizowano przy założeniu liniowo-sprężystego modelu materiału i małych przemieszczeń. Rozpatrzono różne schematy statyczne P-I (rys. 2a) i P-II (rys. 2b), uwzględniając najbardziej niekorzystne obciążenie: w przypadku schematu P-I – czterema siłami (w węzłach 2, 3, 4, 5 lub w węzłach 7, 8, 9, 10), a w przypadku schematu P-II – ośmioma siłami (w węzłach 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10).

W analizie niezawodności rozpatrywano dwa warianty opisu zmiennych losowych. W przypadku A (tab. 1) posłużono się tylko rozkładem normalnym dla każdej zmiennej

Tabela 1. Opis zmiennych losowych (przypadek A)
Table 1. Description of random variables (case A)

Zmienne losowe Random variables	Rozkład prawdopodobieństwa Probability distribution	Wartość średnia Average value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik Zmienności Coefficient of variation
P	normalny normal	150 kN	15 kN	10%
E	normalny normal	210 GPa	16,8 GPa	8%
A	normalny normal	$137 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$8,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	6%

Tabela 2. Opis zmiennych losowych (przypadek B)
Table 2. Description of random variables (case B)

Zmienne losowe Random variables	Rozkład prawdopodobieństwa Probability distribution	Wartość średnia Average value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik Zmienności Coefficient of variation
P	gumbel gumbel	145,224 kN	13,031 kN	9%
E	log-normalny log-normal	210 GPa	16,8 GPa	8%
A	log-normalny log-normal	$137 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	$8,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	6%

losowej, a w przypadku B (tab. 2) zaproponowano rozkłady zmiennych adekwatne do ich charakteru. Transformację parametrów normalnych na parametry innego rozkładu oszacowano metodą kolokacji w punkcie centralnym [Murzewski 2001]. Zastosowane wartości współczynników zmienności przyjęto na podstawie badań statystycznych w zakresie wytrzymałości materiałów i wyrobów budowlanych [Gwóźdź i Machowski 2011]. Dla zmiennych z zakresu obciążeń wartości współczynników przyjęto na mocy obowiązujących zaleceń [JCSS 2001].

W opisie parametrów projektowych jako wielkości deterministyczne przyjęto długości elementów, współrzędne węzłów oraz punktów podporowych, natomiast jako zmienne losowe – obciążenie węzłowe (P), moduł sprężystości (E) oraz pole przekroju elementu (A). Duże znaczenie przy ocenie niezawodności konstrukcji ma parametr imperfekcji geometrycznych konstrukcji. W dalszych badaniach parametr ten będzie dodatkowo uwzględniony jako zmienna losowa. Celem pracy było pokazanie różnic w modelowaniu schematu obliczeniowego poprzez dobór funkcji rozkładu prawdopodobieństwa adekwatnego do charakteru zmiennych losowych.

W analizowanym przypadku kryterium awarii konstrukcji nośnej zostało określone przez dwie funkcje związane odpowiednio ze stanem granicznym nośności oraz ze stanem granicznym użyteczności. Funkcje te określono przy użyciu programu Mathematica, w którym utworzono moduł do obliczeń symbolicznych, wykorzystujący metodę elementów skończonych, a następnie wprowadzono do programu niezawodnościowego STAND [Knabel i in. 2008, Stocki i in. 2009].

Funkcję graniczną związaną ze stanem granicznym nośności zdefiniowano w postaci:

$$g_N(\mathbf{X}) = 1 - \frac{nP}{N_{b,Rd}} \quad (8)$$

natomiast funkcję graniczną odnoszącą się do stanu granicznego użyteczności opisano wzorem:

$$g_U(\mathbf{X}) = 1 - \frac{nP}{q_{dop}EA} \quad (9)$$

gdzie: n – mnożnik zależny od schematu obciążenia,

$N_{b,Rd}$ – nośność ze względu na wyoboczenie dla pojedynczego elementu konstrukcji,

q_{dop} – przemieszczenie dopuszczalne [PN-85-S-10030]: $q_{dop} = L/700$; dla rozważanej konstrukcji $q_{dop} = 0,03$ m.

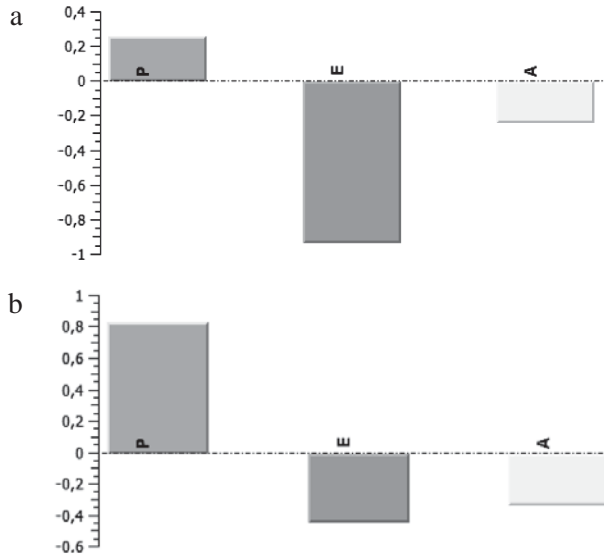
W wyniku przeprowadzonej analizy niezawodnościowej wyznaczono wartości wskaźnika niezawodności Hasofera-Linda β_{H-L} dla stanu granicznego nośności oraz dla maksymalnego przemieszczenia pionowego q_{max} (tab. 3 i 4). W tym celu wykorzystano metodę FORM. Dodatkowo dla stanu granicznego użyteczności z programu STAND uzyskano wykresy przedstawiające wrażliwość wskaźnika niezawodności β_{H-L} na poszczególne zmienne losowe (rys. 4 i 5).

Tabela 3. Wartości wskaźnika niezawodności β_{H-L} dla schematu P-I
Table 3. The Hasofer-Lind reliability index β_{H-L} for scheme P-I

Rodzaj analizy Type of analysis	Stan graniczny nośności Ultimate limit state	Stan graniczny użyteczności Serviceability limit state
Przypadek A Case A	4,65	9,89
Przypadek B Case B	3,38	9,61

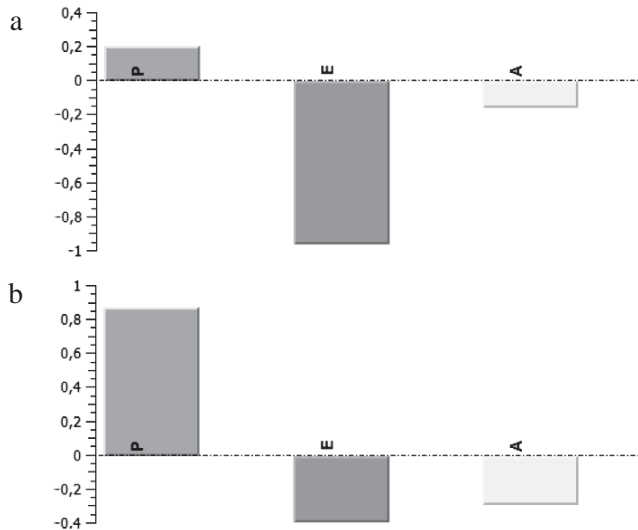
Tabela 4. Wartości wskaźnika niezawodności β_{H-L} dla schematu P-II
Table 4. The Hasofer-Lind reliability index β_{H-L} for scheme P-II

Rodzaj analizy Type of analysis	Stan graniczny nośności Ultimate limit state	Stan graniczny użyteczności Serviceability limit state
Przypadek A Case A	3,84	10,35
Przypadek B Case B	3,03	10,22



Rys. 4. Wykresy wrażliwości wskaźnika niezawodności na zmienne losowe dla q_{\max} w schemacie P-I: a – przypadek A, b – przypadek B

Fig. 4. The graphs of sensitivity reliability index on random variables for q_{\max} in scheme P-I: a – case A, b – case B



Rys. 5. Wykresy wrażliwości wskaźnika niezawodności na zmienne losowe dla q_{\max} w schemacie P-II: a – przypadek A, b – przypadek B

Fig. 5. The graphs of sensitivity reliability index on random variables for q_{\max} in scheme P-II: a – case A, b – case B

PODSUMOWANIE

Celem pracy było przeprowadzenie analizy niezawodności konstrukcji mostu stalowego przy zastosowaniu dwóch wariantów opisu zmiennych losowych – rozkładów normalnych (przypadek A) oraz rozkładów dostosowanych do natury danej zmiennej (przypadek B). Analizę przeprowadzono dla dwóch schematów statycznych P-I i P-II.

W wyniku przeprowadzonej analizy niezawodnościowej wyznaczono wartości wskaźnika niezawodności Hasofera-Linda β_{H-L} dla stanu granicznego nośności i użyteczności. W tym celu wykorzystano metodę FORM. Dodatkowo dla stanu granicznego użyteczności z programu STAND uzyskano wykresy przedstawiające wrażliwość wskaźnika niezawodności β_{H-L} na poszczególne zmienne losowe (rys. 4 i 5).

Analizując wyniki uzyskane dla stanu granicznego nośności, można zauważyć, że w przypadku A wartość wskaźnika niezawodności Hasofera-Linda β_{H-L} (tab. 3 – schemat P-I, tab. 4 – schemat P-II) spełnia warunek normowy ($\beta_{H-L} > 3,8$), ale w przypadku B wartość wskaźnika jest poniżej zaleceń normowych. Procentowy spadek wartości wskaźnika pomiędzy przypadkami A i B wynosi odpowiednio dla schematu P-I – 27,3%, a dla schematu P-II – 21,1%. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że warunek nośności ze względu na ściskanie z uwzględnieniem wybozczenia dla najbardziej wyężonego elementu w analizowanych kratownicach jest spełniony. Dla schematu P-I najbardziej wyężonymi prętami są dwa elementy pasa górnego (element 13–14 i element 14–15 lub element 18–19 i element 19–20), przy czym wyężenie tych elementów wynosi 68%, natomiast w przypadku schematu II najbardziej wyężony jest krzyżulec (element 6–16), dla którego wyężenie wynosi 72%.

Na tej podstawie należy wnioskować, że zastosowanie rozkładu normalnego w odniesieniu do rzeczywistych obciążeń może prowadzić do grubych błędów w ocenie niezawodności. Zdecydowanie niegaussowski charakter mają obciążenia atmosferyczne. Rzetelna ocena niezawodności konstrukcji powinna więc uwzględniać odpowiedni rozkład gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej.

Przeprowadzając analizę niezawodności z uwagi na stan graniczny użyteczności niezależnie od charakteru zmiennych losowych, uzyskano wyniki (tab. 3 – schemat P-I, tab. 4 – schemat P-II) spełniające warunek normowy ($\beta_{H-L} > 1,5$). W tym przypadku istotne jest zbadanie wrażliwości wskaźnika niezawodności β_{H-L} na zmiany charakterystyk probabilistycznych rozważanych zmiennych losowych. Analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że rodzaj rozkładu prawdopodobieństwa wpływa na to, która zmienna losowa ma największą wrażliwość na wartość wskaźnika niezawodności. Przy rozkładzie normalnym zmiennych losowych wskaźnik niezawodności wykazuje największą wrażliwość dla zmiennej E (rys. 4a, rys. 5a), natomiast w przypadku rozkładów adekwatnych do charakteru zmiennej największą wrażliwość na wartość wskaźnika ma zmienna P (rys. 4b, rys. 5b). Znajomość tej wrażliwości ma duże znaczenie w lepszym zrozumieniu pracy konstrukcji. Duża wrażliwość wskaźnika na daną zmienną, a tym samym na parametry jej rozkładu, obliuguje do wnikliwej analizy badań statystycznych w zakresie wytrzymałości materiałów i wyrobów budowlanych przed zdefiniowaniem wartości średniej i odchylenia standardowego. Niewłaściwe, a zarazem obarczone błędem już na wstępie obliczeń wydaje się podejście, w którym wszystkim zmiennym przypisuje się tę samą wartość współczynnika zmienności. Należy zwrócić uwagę również na fakt, że

jeżeli wrażliwość wskaźnika niezawodności ze względu na zmienną losową X jest mała w porównaniu z innymi zmiennymi, to można uznać, iż wpływ tej zmiennej na wartość prawdopodobieństwa awarii jest niewielki i w kolejnych obliczeniach traktować ją jako parametr deterministyczny. Pozwala to na uproszczenie opisu modelu matematycznego. Analiza wrażliwości może być również punktem wyjścia w zagadnieniach optymalizacji na etapie projektowania konstrukcji.

Podsumowując powyższe analizy, można wysnuć następujące wnioski:

- spełnienie warunków nośności nie zawsze oznacza spełnienie normowego warunku niezawodności (w analizowanej konstrukcji problem ten pojawił się w przypadku uwzględnienia rozkładu adekwatnego do charakteru zmiennej losowej – tab. 3 i 4, przypadek B),
- określając kryterium awarii konstrukcji przez funkcję graniczną związaną ze stanem granicznym użyteczności, należy, w celu lepszego zrozumienia pracy konstrukcji, przeprowadzić analizę wrażliwości wskaźnika niezawodności β_{H-L} na zmiany charakterystyk probabilistycznych rozważanych zmiennych losowych,
- analizując niezawodność konstrukcji mostu z uwagi na stan graniczny nośności, niezależnie od przyjętego rozkładu zmiennych losowych, można stwierdzić, że nieznacznie większą wartość wskaźnika niezawodności β_{H-L} otrzymuje się w przypadku kratownicy zbudowanej z dwóch niezależnych przęseł (schemat P-I).

PIŚMIENNICTWO

- Gwóźdź, M., Machowski, A. (2011). Wybrane badania i obliczenia konstrukcji budowlanych metodami probabilistycznymi. Wydawnictwo PK, Kraków.
- Hasofer, A.M., Lind, N.C. (1974). Exact and invariant second moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 100, 111–121.
- Hohenbichler, M., Rackwitz, R. (1981). Non-normal dependent vectors in structural safety. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 107, 1227–1238.
- JCSS (2001). Probabilistic Model Code. Joint Committee of Structural Safety.
- Knabel, J., Kolanek, K., Nguyen Hoang, V., Stocki, R., Tazowski, P. (2008). Structural reliability analysis using object oriented environment STAND. In proceedings of the 36th Solid Mechanics Conference, Gdańsk, Poland.
- Murzewski, J. (2001). Podstawy projektowania i niezawodność konstrukcji. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- PN-85-S-10030 (1985). Obiekty mostowe – obciążenia.
- Rackwitz, R., Fiessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & Structures*, 9, 5, 489–494.
- Rosenblatt, M. (1952). Remarks on a Multivariate Transformation. *The Annals of Mathematical Statistic*, 23, 3, 470–472.
- Stocki, R., Kolanek, K., Knabel, J., Tazowski, P. (2009). FE based structural reliability analysis using STAND environment. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 16, 35–58.

THE APPLICATION OF THE FORM METHOD IN RELIABILITY ANALYSIS OF THE STEEL TRUSS BRIDGE

Abstract. The aim of the study is a probabilistic analysis of a steel truss bridge. Structural design parameters were defined as deterministic values and random variables. The latter were not correlated. In the reliability analysis two variants of the description of random variables were considered. In the Variant I the normal distribution was used whereas in the Variant II – different types of probability distribution appropriate for the nature of the variable were proposed. The transformation of normal parameters into the parameters of another distribution was estimated by collocation method at the central point. The criterions of structural failure were expressed by a limit function related to the serviceability limit state and ultimate limit state. The module for symbolic computation using the Finite Element Method was created in the Mathematica software and used to define limit functions for different load schemes. These functions were the starting point for the probabilistic analysis for which the reliability software STAND was used. The Hasofer-Lind reliability index was estimated using the FORM method. In addition, the study presents graphs of sensitivity of the reliability index to the random variables.

Key words: random variables, probability distribution, the FORM method, the Hasofer-Lind reliability index, sensitivity of the reliability index

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.12.2015

Cytowanie: Dudzik, A., Obara, P., Radoń, U. (2015). *Niezawodność stalowego mostu kratowego*. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 14 (4), 13–23.