

DOROTA BIEDRZYCKA

Zakład Konstrukcji Stalowych

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

Politechniki Łódzkiej

MARCIN KAMIŃSKI

Zakład Konstrukcji Stalowych

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

Politechniki Łódzkiej

STATYSTYCZNA WERYFIKACJA NIEZAWODNOŚCI PRZEWODÓW NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

Opiniodawca: **prof. dr hab. inż. Paweł Śniady**

Niniejszy artykuł jest poświęcony określeniu współczynnika niezawodności dla napowietrznych przewodów linii energetycznych, które są szczególnie wrażliwe na oddziaływania atmosferyczne o charakterze losowym, a nawet stochastycznym. Analiza została przeprowadzona na podstawie istniejącego modelu teoretycznego i jego rozwiązania analitycznego, w którym uwzględniono losowe obciążenie szadzią całego przewodu. Modelowanie komputerowe zostało przeprowadzone za pomocą programu do obliczeń symbolicznych MAXIMA, w którym zrealizowano metodę symulacji Monte-Carlo do znalezienia pierwszych czterech momentów losowych naprężeń w linie oraz jej ugięć. Na ich podstawie dokonano wyznaczenia indeksu niezawodności celem weryfikacji projektu.

1. Wstęp

Jak wiadomo z licznych opracowań inżynierskich [3], napowietrzne linie energetyczne narażone na liczne czynniki atmosferyczne, dość często ulegają awariom w trakcie eksploatacji i wiąże się to między innymi z osadem szadzi (lodu) na wszystkich elementach konstrukcyjnych i przesyłowych. Problem ten dotyczy oczywiście również i innych konstrukcji budowlanych ze szczególnym

uwzględnieniem wysokich konstrukcji stalowych [6]. Ze względu na nieprzewidywalny charakter tych obciążeń na przestrzeni lat, a także wymagania nakładane przez normę dotyczącą podstaw projektowania konstrukcji [12], niezbędna jest losowa analiza odpowiednich funkcji stanu takich linii (siły naciągu czy maksymalnego zwisu) prowadząca do określenia dla konkretnej konstrukcji odpowiadającego jej indeksu niezawodności. Indeks ten można wyznaczać wieloma różnymi metodami opisanymi np. w pozycjach [4, 5, 9], które prowadzą do bezpiecznych i jednocześnie optymalnych metod projektowania konstrukcji [7]. Jednocześnie, jak wiadomo, analizę losową można przeprowadzić jedną z wielu dostępnych metod w zakresie probabilistycznej analizy konstrukcji, jak np. metodami spektralnymi [8] lub perturbacyjnymi [2]. Ze względu jednak na fakt, iż badane siły oraz przemieszczenia są rozwiązaniami analitycznego równania trzeciego rzędu, w którym teoretycznie możemy otrzymać rozwiązania zespolone, stosujemy statystyczną metodę symulacji Monte-Carlo.



Rys. 1. Pokrycie szadzią i katastrofy linii energetycznych
Fig. 1. Hoarfrost covers and damage of the overhead power lines

Niniejsza praca opisuje procedurę wyznaczenia wskaźnika niezawodności dla stanu granicznego użytkowania przewodów napowietrznych linii energetycznych [10, 11] z wykorzystaniem metody Monte-Carlo zaimplementowanej w programie MAXIMA z wykorzystaniem zaleceń normy [12]. W obliczeniach zakłada się, że jedynymi obciążeniami oddziałującymi na przewód, oprócz zmian temperatury, jest jego ciężar własny oraz obciążenie szadzią. Obciążenie to traktujemy jako zmienną losową o rozkładzie gaussowskim o zadanej wartości oczekiwanej oraz odchyleniu standardowym, które jest dodatkowym parametrem projektowym analizowanej linii. W celu weryfikacji optymalnej ilości prób losowych dla osiągnięcia z góry zadanej dokładności obliczeń przeprowadzono szereg eksperymentów numerycznych dla ilości prób odpowiadających kolejnym potęgom liczby 10. Uzyskane wyniki dokumentują zasadność modelowania niezawodności napowietrznych linii energetycznych w oparciu o stan graniczny użytko-

wania i potwierdzają to, że losowy rozrzut zwisu liny wzrasta nieproporcjonalnie szybciej do rozrzutu grubości szadzi zbierającej się na niej.

2. Matematyczny model liny

Rozważany jest układ n -przęseł o rozpiętościach l_i tworzących sekcję odciągową dla liniowo-sprężystej i przyzmatycznej liny o przekroju stałym na długości. Ze względu na znaczne odkształcenia w trakcie eksploatacji liny analizujemy dwa następujące stany:

- (0) początkowy (tzw. faza montażu), w którym znane są parametry przewodu A , E , α , jego temperatura t_0 oraz pozioma składowa naciągu H_0 . W tym stanie na przewód oddziałuje wyłącznie jego ciężar własny g_0 .
- (1) końcowy (tzw. faza użytkowania), w którym znane są parametry przewodu A , E , α oraz jego temperatura t_1 . W tym stanie na przewód oddziałuje ciężar własny przewodu oraz kombinacja obciążeń wiatru i lodu (szadzi). W omawianym modelu rozpatrywany będzie przypadek, w którym obciążenie g_1 stanowi kombinacja ciężaru własnego i obciążenia szadzią S . Obciążenie szadzią przyjęto jako zmienną losową o rozkładzie gaussowskim, ze znaną wartością średnią i odchyleniem standardowym.

Podstawowe równanie zmiany stanu jest formułowane następująco [1, 3]:

$$H_1^3 + EA \left(\alpha(t_1 - t_0) + \frac{g_0^2 L^2}{24H_0^2} - H_0 \right) H_1^2 - \frac{EA}{24} g_1^2 L^2 = 0, \quad (1)$$

gdzie g_0 – obciążenie w stanie montażowym (ciężar własny przewodu) [N/m],

g_1 – obciążenie użytkowe (ciężar własny + obciążenie szadzią) [N/m],

t_0 – temperatura przewodu dla obciążenia g_0 [°C],

t_1 – temperatura przewodu dla obciążenia g_1 [°C],

H_0 – składowa pozioma naciągu liny dla obciążenia g_0 [N],

H_1 – składowa pozioma naciągu liny dla obciążenia g_1 [N],

A – przekrój poprzeczny przewodu [mm²],

E – moduł Younga przewodu [MPa],

α – współczynnik rozszerzalności cieplnej przewodu [1/°C],

L – rozpiętość przęsła równoważnego [m].

$$L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_i^3}{\sum_{i=1}^n l_i}}. \quad (2)$$

Należy podkreślić, iż rozwiązanie analityczne równania (1) istnieje i można je uzyskać za pomocą dowolnego pakietu obliczeń symbolicznych, ale ze względu na stopień skomplikowania algebraicznego nie zostanie ono tutaj zaprezentowane. Pamiętać również należy, że zależnie od kombinacji parametrów projektowych istnieje możliwość uzyskania wartości zespolonej, więc zautomatyzowane obliczenia i symulacje komputerowe należy prowadzić przy sprawdzaniu zerowania się części zespolonej tego rozwiązania. W dalszym ciągu obliczamy zwiększenie obciążenia oddziaływującego na pojedyncze przęsło ze względu na różnicę wysokości zaczeplenia końców przewodu:

$$q = \frac{g_1}{L_p} \sqrt{c^2 + L_p^2}, \quad (3)$$

gdzie L_p to rzeczywista rozpiętość rozpatrywanego przęsła [m], natomiast c jest różnicą wysokości zaczeplenia końców przewodu [m]. Ostatecznie zwis przewodu jest równy [m]

$$f = \frac{qL_p^2}{8H_1}. \quad (4)$$

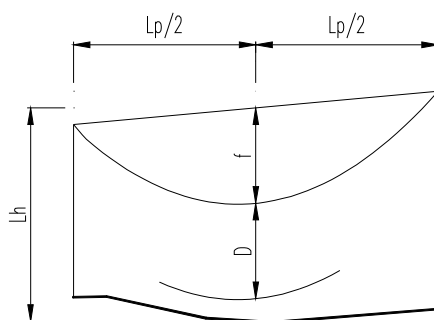
Przy definiowaniu funkcji stanu granicznego użytkownika (SGU) zwisu przewodu wykorzystano załącznik C normy [12], z którego wynika, że

$$g = L_h - D - f. \quad (5)$$

L_h – opisuje tutaj pionową odległość mierzoną w połowie rozpiętości przęsła od cięciwy do poziomu terenu (rys. 2) [m], D – minimalny odstęp izolacyjny od gruntu [m], natomiast f – zwis przewodu [m]. Wskaźnik niezawodności dla funkcji stanu granicznego definiowany jest następująco:

$$\beta = \frac{E[g]}{\sigma(g)}, \quad (6)$$

gdzie $E[g]$ jest wartością średnią funkcji stanu granicznego, natomiast $\sigma(g)$ jest odchyleniem standardowym dla tej funkcji.



Rys. 2. Schemat przęsła

Fig. 2. Span scheme and geometry

3. Procedura numeryczna w programie MAXIMA

Symulację wykonano na podstawie danych projektowych rzeczywistej linii elektroenergetycznej 110 kV z przewodami fazowymi AFL-6 120 i poziomą składową naciągu montażowego przewodów przy temperaturze $t_0 = 10^\circ\text{C}$ wynoszącą $H_0 = 7206,87$ N. Ze względu na okres, w którym projektowana była rozpatrywana linia, przy wyznaczaniu obciążeń oraz dopuszczalnych odstępów izolacyjnych posłużono się normą [10]. Poniżej przedstawiono wyniki otrzymane przy zastosowaniu darmowego oprogramowania matematycznego MAXIMA dla liczności próby $n_s = 1000$ (wartość średnia obciążenia $E[S] = 7,0538$ [N/m], odchylenie standardowe $\sigma(S) = 0,70538$ [N/m]). Poniżej przedstawiono przykładowe dane wejściowe do symulacji (rys. 3). Na kolejnych rysunkach można zweryfikować zestaw przykładowych wyników (rys. 4), a następnie ostateczny histogram funkcji granicznej g (rys. 5). Jak widać, rozkład prawdopodobieństwa funkcji g jest rozkładem bardzo zbliżonym do rozkładu gaussowskiego, co lepiej dokumentują wyniki symulacji przedstawione w następnym paragrafie.

```

    Ruling span length - L - [m]:
(%o16) 301
    Single span length - L_p - [m]:
(%o18) 310
    Span unevenness - c - [m]:
(%o20) 1.4
    Conductor area - A - [mm2]:
(%o22) 143.5
    Conductor Young's modulus - E - [MPa]:
(%o24) 75188
    Conductor thermal elongation factor - eps - [1/degC]:
(%o26) 1.8700000000000004 10-5
    Initial temperature - t0 - [degC]:
(%o28) 10
    Final temperature - t1 - [degC]:
(%o30) -5
    Horizontal force during initial conditions - H0 - [N]:
(%o32) 7206.87
    Conductor weight - g - [N/m]:
(%o34) 4.9524

    Ice load - S[i] - [N/m] - stochastic variable:
    Mean value:
(%o38) 7.0538
    standard deviation:
(%o40) 0.70538
    Sample size:
(%o42) 1000

    Initial load - g0 - [N/m]:
(%o46) 4.9524

    Input data completed successfully!
```

Rys. 3. Przykładowe dane wejściowe do symulacji

Fig. 3. Example of input for the simulation

```

Equation for tensile horizontal force calculation => H(H1) = 0, where :
(%o47) H(H1):=H13+ $\left(E A \text{ eps}(t1-t0)+\frac{E A g0^2 L^2}{24 H0^2}-H0\right)H1^2-\frac{E A g1_i^2 L^2}{24}$ 

Adjusted vertical load - q[i] - [N/m]:
(%o56) q(q1):= $\frac{g1_i L_p}{\sqrt{c^2+L_p^2}}$ 

Sag - f[i] - [m]:
(%o62) f(H, q):= $\frac{q_i L_p^2}{8 H_i}$ 

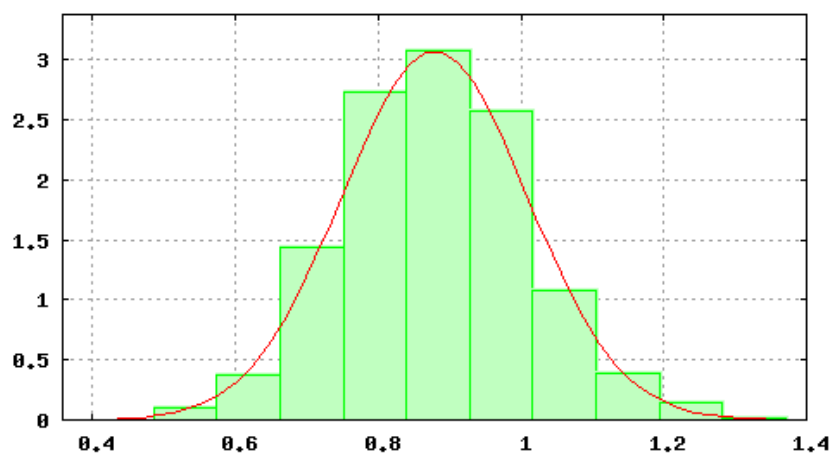
Calculation completed successfully!

Distance from ground to the middle of the span chord - L_p - [m]:
(%o274) 15.93
Min clearance to ground acc. to code PN-E/05100 - D - [m]:
(%o276) 5.74
Limit state function - [ g = (L_p - D) - f ] - [m]:

Mean value:
(%o281) 0.87928654272683
Variance:
(%o283) 0.016894847897696
Standard deviation:
(%o285) 0.12998018271143
Coefficient of variation:
(%o287) 0.14782460141871
Skewness coefficient:
(%o289) 0.18738428204599
Kurtosis coefficient:
(%o291) 0.15592840600297
Reliability index:
(%o293) 6.764773863097063

```

Rys. 4. Przykładowe wyniki symulacji
 Fig. 4. Example output data from the simulation

Rys. 5. Przykładowy histogram funkcji granicznej (g)Fig. 5. Histogram of the limit state function (g)

Kolejno przeprowadzono weryfikację zbieżności metody symulacji dla prób o liczebnościach w zakresie 10^1 - 10^5 , dla których wyznaczono wartość oczekiwaną, odchylenie standardowe, współczynnik wariancji, skośność, kurtozę oraz wskaźnik niezawodności. Dane te miały posłużyć do określenia optymalnej ilości prób losowych dla otrzymania stabilnych wartości pierwszych dwóch momentów i badanego wskaźnika. Wyniki komputerowej weryfikacji zbieżności poszczególnych estymatorów przedstawiono poniżej (tabela 1). Pokazują one, że do dostatecznie wiarygodnego wyznaczenia wartości oczekiwanej i odchylenia standardowego funkcji granicznej (a zatem i wskaźnika niezawodności) potrzeba i wystarcza 10.000 prób losowych.

Tabela 1. Funkcja stanu granicznego dla zwisu g [m]Table 1. Limit state function for the sag g [m]

Liczebność próby	10	100	1000	10 000	100 000
Wartość oczekiwana	0,819	0,869	0,879	0,877	0,878
Wariancja	0,012	0,016	0,017	0,017	0,017
Odchylenie standardowe	0,112	0,127	0,130	0,131	0,131
Współczynnik wariancji	0,136	0,146	0,148	0,150	0,150
Skośność	0,158	0,298	0,187	0,096	0,101
Kurtoza	-1,593	0,501	0,156	-0,043	0,039
Wskaźnik niezawodności	7,329	6,847	6,765	6,678	6,678

4. Komputerowa symulacja wpływu losowości obciążenia szadzią

Kolejno przeprowadzono komputerową symulację wpływu losowości obciążenia szadzią przewodów linii elektroenergetycznych weryfikując wartości oczekiwane, wariancje, odchylenia standardowe, współczynniki wariancji, skośność, kurtozę oraz wskaźnik niezawodności dla składowej poziomej siły naciągu (tabela 2), zwisu przewodu (tabela 3) oraz całkowitej funkcji granicznej (tabela 4). W tym celu przyjęto liczbę prób losowych równą 10.000, pozostałe parametry projektowe jak dla eksperymentów przeprowadzonych w poprzednim paragrafie, natomiast odchylenie standardowe obciążenia stanowiło kolejno 5, 10, 15, 20 oraz 25% odpowiedniej wartości oczekiwanej.

Dane zestawione w tabeli 2 pozwalają stwierdzić, że wzrost miary niepewności co do grubości pokrywy szadzi na linii energetycznej nie ma znaczącego wpływu na wartość oczekiwaną składowej poziomej naciągu liny. Jednocześnie okazuje się, że współczynnik wariancji tej siły jest co prawda liniowo zależny od wejściowego współczynnika wariancji, ale wartości końcowe są ponad dwukrotnie mniejsze od wejściowych, tak więc wskaźniki niezawodności odnoszące się do naprężeń (SGN) nie powinny ulec zasadniczym zmianom. Funkcje rozkładu prawdopodobieństwa są bardzo zbliżone do gaussowskich, jak wynika z wartości przyjmowanych przez współczynniki skośności i kurtozy bardzo bliskie zeru (zarówno dodatnie, jak i ujemne).

Tabela 2. Pozioma składowa siły H_I [N]Table 2. Horizontal tension H_I [N]

Wielkość statystyczna	Wejściowy współczynnik wariancji				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Wartość oczekiwana	15474,85	15477,35	15454,75	15475,43	15435,37
Wariancja	120827,1	477253,4	1105621	1916460	2978924
Odchylenie standardowe	347,62	690,84	1051,49	1384,36	1725,96
Współczynnik wariancji	0,022	0,045	0,068	0,089	0,112
Skośność	-0,021	-0,073	-0,068	-0,150	-0,129
Kurtoza	-0,018	0,046	-0,054	0,083	0,065

Nieco odmiennie kształtują się parametry losowe zwisu przewodu zebrane poniżej (tablica 3). Jakkolwiek wartości oczekiwane ponownie wykazują małą wrażliwość na rozrzut losowy wielkości osadu szadzi na powierzchni kabli, to otrzymane współczynniki wariancji są znacząco większe od wejściowych. Oznacza to, że weryfikując wskaźniki niezawodności wystarczy wziąć pod uwagę stan graniczny użytkownika (SGU); dla kompletności tego wniosku należałoby wykonać odpowiednią analizę komputerową zwisu przewodu dla przypadku obciążeniowego uwzględniającego odpowiednią temperaturę roboczą przewodu

w zależności od wymagań projektowych linii [10, 11], a ponadto przeprowadzić analizę obciążalności termicznej [13, 14]. Oczywiście obciążenie dodatkowe szadzią zostałyby pominięte, ale odkształcenie termiczne mogłoby wzrosnąć znacząco, wydłużając sam przewód i jednocześnie badany zwis.

Tabela 3. Zwis przewodu f [m]Table 3. Conductor sag f [m]

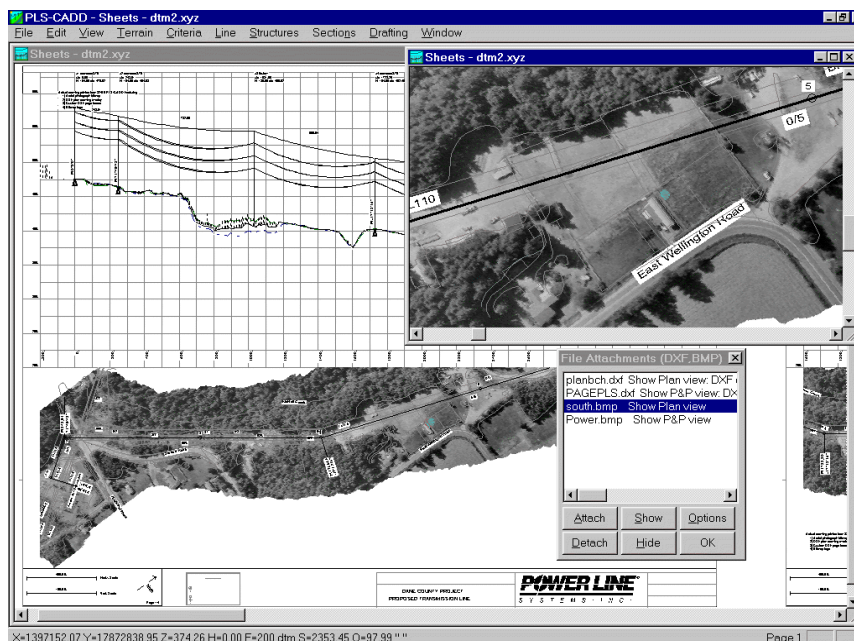
Wielkość statystyczna	Wejściowy współczynnik wariancji				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Wartość oczekiwana	9,312	9,311	9,306	9,308	9,298
Wariancja	0,004	0,017	0,040	0,070	0,109
Odchylenie standardowe	0,066	0,132	0,200	0,264	0,330
Współczynnik wariancji	0,007	0,014	0,022	0,028	0,036
Skośność	-0,042	-0,116	-0,131	-0,239	-0,240
Kurtoza	-0,016	0,063	-0,028	0,149	0,154

Tabela 4. Funkcja stanu granicznego dla zwisu g [m]Table 4. Limit state function for sag g [m]

Wielkość statystyczna	Wejściowy współczynnik wariancji				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Wartość oczekiwana	0,878	0,879	0,884	0,882	0,891
Wariancja	0,004	0,017	0,040	0,070	0,109
Odchylenie standardowe	0,066	0,132	0,200	0,264	0,3301
Współczynnik wariancji	0,075	0,150	0,227	0,300	0,370
Skośność	0,042	0,116	0,131	0,239	0,240
Kurtoza	-0,016	0,063	-0,028	0,149	0,154
Wskaźnik niezawodności	13,280	6,679	4,411	3,336	2,701

Ostatecznie analizujemy parametry losowe funkcji stanu granicznego g zgromadzone w tabeli powyżej (tabela 4). Wartość oczekiwana tej funkcji nieznacznie wzrasta wraz ze wzrostem wejściowego współczynnika wariancji, natomiast ten sam współczynnik funkcji g wzrasta znacznie szybciej niż współczynnik wejściowy. Maksymalny rozrzut losowy obciążenia początkowego odpowiadający 25% jego wartości oczekiwanej odpowiada odchyleniu standardowemu równemu w przybliżeniu 37% wartości oczekiwanej g . Praktycznie oznacza to, że wartość oczekiwana stanu granicznego zwisu może z prawdopodobieństwem bliskim 1 być zarówno o 100% mniejsza, jak i większa. Wynika to ze znanej reguły trzech sigm, której zastosowanie w analizowanym przypadku jest uzasadnione tym, że wyjściowy rozkład prawdopodobieństwa funkcji g jest bardzo zbliżony do gaussowskiego. Jest to prostym następstwem histogramu

przedstawionego na rysunku 5 oraz wartości skośności i kurtozy zestawionych w tabeli 4. Pokazany przykład jest ilustracją intuicyjnie jednoznacznej zależności, że konstrukcja zaprojektowana w fazie deterministycznej ze stosunkowo niewielkim zapasem bezpieczeństwa może, dla odpowiednio dużego rozrzutu wejściowych zmiennych losowych być uważana za nieprawidłowo zaprojektowaną. Analizując wyniki zgromadzone w ostatnim wierszu tabeli 4 można stwierdzić, iż o ile dla pierwszych dwóch współczynników wariancji (0,05 i 0,10) wskaźnik niezawodności spełnia wymagania odpowiadające wszystkim klasom niezawodności, o tyle dla pozostałych weryfikacja jest negatywna. Napowietrzne linie energetyczne należy bowiem uznać w świetle klasyfikacji wprowadzonej przez normę [12] do obiektów o szczególnym znaczeniu strategicznym i ekonomicznym.



Rys. 6. Komputerowe projektowanie przebiegu linii energetycznych
Fig. 6. CAD procedures for the overhead power lines

Biorąc pod uwagę stopień skomplikowania procedur symulacyjnych wykorzystanych do analizy niezawodności napowietrznych linii elektroenergetycznych można wyobrazić sobie całkowitą integrację takiej procedury numerycznej z odpowiednim oprogramowaniem CAD wspomagającym projektowanie (okno główne takiego programu pokazano na rysunku 6). Takie rozszerzenie możliwości działania programu projektującego wymaga wprowadzenia opcji zadawania odchyłek standardowych oraz wyboru odpowiednich rozkładów prawdopodobieństwa zadeklarowanych zmiennych losowych. Niezbędna jest oczywiście wspólna kompilacja z programem symulacyjnym, którego algorytm umożliwia napisanie programu w jednym z klasycznych języków programowania.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych w pracy symulacji komputerowych zagadnienia weryfikacji niezawodności napowietrznych linii energetycznych obciążonych szadzią można jednoznacznie stwierdzić, że do wystarczająco dokładnego wyznaczenia wskaźnika niezawodności wystarcza około 10.000 prób losowych. Okazuje się jednocześnie, że w przypadku analizowanego zagadnienia największe znaczenie ma funkcja graniczna zwisu przewodu, gdyż współczynniki wariacji tego zwisu są wielokrotnie bardziej wrażliwe na losowy rozrzut obciążenia liny niż odpowiednie współczynniki dla naprężeń. Wzrost współczynnika wariacji tych obciążeń z około 5% do ponad 15% może prowadzić do konieczności dyskwalifikacji konstrukcji z punktu widzenia jej niezawodności. Ostatecznie można zauważyć, że otrzymane wynikowe rozkłady losowe są bardzo zbliżone do rozkładu Gaussa, a więc do ich jednoznacznego określenia wystarczają pierwsze dwa momenty losowe, a także można z powodzeniem stosować regułę trzech sigm.

Niewątpliwie w dalszych badaniach nad tym zagadnieniem, koncentrujących się tylko nad następstwami statycznego równania równowagi należy uwzględnić możliwość pojawiania się wielu zmiennych losowych wśród parametrów projektowych i ich ewentualnej korelacji. Wiadomo jednocześnie, że obciążenia połączeniami śniegu i pokrywami lodowymi teoretycznie powinny być modelowane jako zmienne zgodne z rozkładami Gumbela, gdzie momenty losowe i wskaźnik niezawodności wyznacza się w nieco odmienny sposób. Model statyczny linii napowietrznych intuicyjnie wydaje się mocno uproszczony i uwzględnienie zjawisk dynamicznych wymuszonych porywami wiatru lub sztucznie indukowanymi drganiami harmonicznymi stosowanymi lokalnie do strącania pokryw i nawisów lodowych powinny być również wzięte pod uwagę. Zjawiska te są również źródłem wielu dramatycznych katastrof budowlanych, szczególnie w regionach polarnych.

Literatura

- [1] **Dyłaż Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.:** Wytrzymałość materiałów, tom 1. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2007.
- [2] **Kamiński M.:** Generalized perturbation-based stochastic finite element method in elastostatics. *Comput. & Struct.* No. 85(10), 2007, s. 586-594.
- [3] **Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U.:** Overhead Power Lines. Planning, design, construction. Springer-Verlag 2003.
- [4] **Melchers R.E.:** Structural Reliability. Analysis and Prediction. Ellis Horwood Ltd. 1987.
- [5] **Murzewski J.:** Niezawodność konstrukcji inżynierskich. Warszawa, Arkady 1989.
- [6] **Rykaluk K.:** Konstrukcje stalowe. Kominy, wieże, maszty. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2004.
- [7] **Stocki R., Kolanek K., Jendo S., Kleiber M.:** Study on discrete optimization techniques in reliability-based optimization of truss structures. *Comput. & Struct.* No 79(22-25), 2001, s. 2235-2247.

- [8] **Śniady P., Adamowski R., Kogut G., Zielichowski-Haber W.:** Spectral stochastic analysis of structures with uncertain parameters. *Prob. Engrg. Mech.* No. 23(1), 2007, s. 76-83.
- [9] **Woliński S., Wróbel K.:** *Niezawodność konstrukcji budowlanych.* Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2001.
- [10] PN-E-05100-1: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa.* Polski Komitet Normalizacyjny 1998.
- [11] PN-EN-50341-1:2005: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV.* Polski Komitet Normalizacyjny 2009.
- [12] Eurokod. *Podstawy projektowania konstrukcji.* PN-EN 1990:2004. Polski Komitet Normalizacyjny 2004.
- [13] IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors. IEEE Standard 738, 2006.
- [14] *Thermal behaviour of overhead conductors.* Technical Brochure No. 207, CIGRE, Working Group 22.12, 2002.

STATISTICAL VERIFICATION OF RELIABILITY FOR THE OVERHEAD POWER LINES

Summary

This article is devoted to a determination of the reliability index for the overhead power lines, which are extremely sensitive to the variety of atmospheric uncertainty and even stochasticity. The analysis has been carried out on the basis of the existing analytical equation and its solution, where additionally uncertain is hoarfrost loading of the entire cable. Computer modeling was performed in the symbolic algebra package MAXIMA (freeware), where the Monte-Carlo simulation has been implemented. Statistical estimation of up to the first fourth probabilistic moments has been done for the cable stresses and deformations together with a verification of the probabilistic convergence of the method. The main results were used in further determination of the reliability index.