



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



KAROL WINKELMANN

EFEKTYWNOŚĆ SYMULACJI
NUMERYCZNYCH W ANALIZIE
WRAŻLIWOŚCI I NIEZAWODNOŚCI
KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH
O PARAMETRACH MATERIAŁOWYCH
I OBCIĄŻENIACH ZMIENNYCH
W CZASIE

GDAŃSK 2024

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Waldemar Magda

RECENZENCI

Urszula Radoń

Jacek Szafran

REDAKCJA JĘZYKOWA

Joanna Niezgoda

SKŁAD

Wioleta Lipska-Kamińska

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://sklep.pg.edu.pl/>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2024

ISBN 978-83-7348-918-9

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 19,44, ark. druku 20,75, 189/1241

Druk i oprawa: Volumina.pl sp. z o.o., 71-063 Szczecin,
ul. Ks. Witolda 7-9, tel. 91 812 09 08

SPIS TREŚCI

| | |
|---|----|
| WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI, OZNACZEŃ I SKRÓTÓW | 7 |
| OD AUTORA | 13 |
| PRZEDMOWA | 15 |
| 1. WPROWADZENIE | 19 |
| 2. DETERMINISTYCZNA (NORMOWA) ANALIZA NIEZAWODNOŚCI KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH | 23 |
| 2.1. Wartość charakterystyczna | 24 |
| 2.2. Wartość obliczeniowa | 26 |
| 2.3. Warunek ogólny zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji inżynierskiej | 27 |
| 2.4. Kombinatoryka obciążeń i stany graniczne konstrukcji z nią związane | 28 |
| 2.4.1. Stan graniczny nośności (SGN) | 29 |
| 2.4.2. Kombinacje obciążeń w ocenie SGN | 30 |
| 2.4.3. Stan graniczny użyteczności (SGU) | 32 |
| 2.4.4. Kombinacje obciążeń w ocenie SGU | 32 |
| 2.5. Możliwość probabilistycznej aktualizacji norm projektowych | 33 |
| 3. NIEZAWODNOŚĆ I WRAŻLIWOŚĆ KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH W UJĘCIU PROBABILISTYCZNYM | 36 |
| 3.1. Probabilistyczna analiza niezawodności konstrukcji | 37 |
| 3.2. Probabilistyczna analiza wrażliwości konstrukcji | 39 |
| 4. PODSTAWOWE POJĘCIA ANALIZY PROBABILISTYCZNEJ KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH | 41 |
| 4.1. Niepewności | 42 |
| 4.2. Zmienna losowa | 44 |
| 4.2.1. Typy zmiennych losowych | 45 |
| 4.2.2. Momenty statystyczne i probabilistyczne zmiennych losowych | 46 |
| 4.2.3. Rozkłady zmiennych losowych | 48 |
| 4.3. Wektor losowy | 63 |
| 4.4. Problem podstawowy analizy niezawodności | 63 |
| 4.5. Prawdopodobieństwo awarii | 66 |
| 4.6. Wskaźnik niezawodności | 68 |
| 4.6.1. Dopuszczalne wartości wskaźnika niezawodności w ujęciu normowym | 69 |
| 4.6.2. Możliwa zmienność wartości wskaźnika niezawodności w czasie użytkowania konstrukcji | 71 |
| 4.6.3. Podejścia probabilistyczne służące do wyznaczania wskaźników niezawodności | 74 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5. | METODY PROBABILISTYCZNEJ ANALIZY NIEZAWODNOŚCI KONSTRUKCJI BAZUJĄCE NA SYMULACJACH | 87 |
| 5.1. | Metoda Monte Carlo (MC, MCM) | 89 |
| 5.1.1. | Wprowadzenie | 89 |
| 5.1.2. | Opis matematyczny metody i estymacja miar bezpieczeństwa konstrukcji | 90 |
| 5.2. | Techniki redukcji wariancji | 93 |
| 5.2.1. | Próbkowanie warstwowe (SS) | 94 |
| 5.2.2. | Próbkowanie hipersześcianem łącińskim (LHS) | 98 |
| 5.2.3. | Próbkowanie losowe celowane (TRS) | 100 |
| 5.2.4. | Próbkowanie wagowe (IS) | 104 |
| 5.2.5. | Próbkowanie adaptacyjne (AS) | 105 |
| 5.2.6. | Symulacja podzbiorowa (SubSim) | 106 |
| 5.3. | Metoda estymacji punktowej (PEM) | 107 |
| 5.4. | Metoda powierzchni odpowiedzi | 112 |
| 5.4.1. | Wprowadzenie | 112 |
| 5.4.2. | Opis matematyczny metody | 114 |
| 5.5. | Autorska propozycja podejścia CRSM – metody RSM kombinowanej z metodami PEM i MC | 118 |
| 6. | METODY PROBABILISTYCZNEJ ANALIZY WRAŻLIWOŚCI KONSTRUKCJI BAZUJĄCE NA SYMULACJACH | 122 |
| 6.1. | Klasyfikacja metod analizy wrażliwości ze względu na zasięg analizy | 124 |
| 6.1.1. | Lokalne metody analizy wrażliwości | 124 |
| 6.1.2. | Globalne metody analizy wrażliwości | 125 |
| 6.2. | Klasyfikacja metod analizy wrażliwości ze względu na charakter analizy | 127 |
| 6.2.1. | Metody kwantyfikacyjne | 128 |
| 6.2.2. | Metody jakościowe (graficzne) | 128 |
| 7. | SYMULACJA NUMERYCZNA KOROZJI (ZMIANY PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH) STALI, ZMIENNEJ W CZASIE | 131 |
| 7.1. | Korozja elektrochemiczna stali jako przyczyna degradacji parametrów wytrzymałościowych elementów konstrukcji | 134 |
| 7.2. | Modele progresji korozji elektrochemicznej przedstawione w wybranych pozycjach literatury | 136 |
| 7.3. | Budowa funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej modelującej ubytek korozyjny | 139 |
| 8. | SYMULACJA NUMERYCZNA SYNERGICZNEGO OBCIĄŻENIA WIEŻ ELEKTROENERGETYCZNYCH WIATREM I OBLODZENIEM, ZMIENNEGO W CZASIE | 145 |
| 8.1. | Zagrożenia wynikające z synergii działania obciążenia wiatrem i oblodzeniem | 145 |

| | |
|--|-----|
| 8.2. Normowe wytyczne do modelowania obciążenia oblodzeniem w relacji do obciążenia wiatrem | 148 |
| 8.3. Model probabilistyczny obciążenia wiatrem i oblodzeniem oraz ich niekorzystnej kombinacji | 151 |
| 8.3.1. Definicja i procedura obliczania zmiennej odpowiedzi konstrukcji wieży elektroenergetycznej | 152 |
| 8.3.2. Obciążenie oblodzeniem (szadzią) jako zmienna losowa | 155 |
| 8.3.3. Obciążenie wiatrem (prędkością wiatru) jako zmienna losowa | 157 |
| 8.3.4. Kombinacja obciążeń zmiennych według stanu granicznego nośności (SGN) dla obciążeń wiatrem i oblodzeniem w ujęciu losowym | 159 |
| 9. PRZYKŁADY NUMERYCZNE WYKORZYSTUJĄCE SYMULACJE DO OCENY ZMIANY WRAŻLIWOŚCI I NIEZAWODNOŚCI KONSTRUKCJI W CZASIE | 163 |
| 9.1. Wieża teoretyczna (testowa) | 167 |
| 9.1.1. Wprowadzenie | 167 |
| 9.1.2. Model, zaimplementowane obciążenia i odpowiedź nominalna wieży testowej | 168 |
| 9.1.3. Analiza wrażliwości odpowiedzi konstrukcji | 174 |
| 9.1.4. Analiza niezawodności konstrukcji | 199 |
| 9.1.5. Analiza zmiany niezawodności konstrukcji w czasie na skutek progresji korozji elektrochemicznej materiału jej elementów | 225 |
| 9.1.6. Wnioski z przykładu | 238 |
| 9.2. Wieża widokowa | 240 |
| 9.2.1. Wprowadzenie | 240 |
| 9.2.2. Model numeryczny wieży widokowej i zaimplementowane obciążenia | 241 |
| 9.2.3. Nominalna odpowiedź mechaniczna konstrukcji wieży widokowej ... | 245 |
| 9.2.4. Zmienne losowe i model probabilistyczny wieży | 248 |
| 9.2.5. Analiza wrażliwości konstrukcji wieży na progresję korozji jej elementów | 253 |
| 9.2.6. Analiza niezawodności konstrukcji | 261 |
| 9.2.7. Wnioski z przykładu | 273 |
| 9.3. Wieża podporowa pod napowietrzną linię elektroenergetyczną | 275 |
| 9.3.1. Wprowadzenie | 275 |
| 9.3.2. Model numeryczny wieży elektroenergetycznej i zaimplementowane obciążenia | 277 |
| 9.3.3. Nominalna odpowiedź mechaniczna konstrukcji wieży elektroenergetycznej | 281 |
| 9.3.4. Zmienne losowe i model probabilistyczny wieży | 284 |
| 9.3.5. Analiza zmiany niezawodności konstrukcji obciążonej łącznie wiatrem i oblodzeniem w ujęciu losowym w różnych punktach czasowych ... | 286 |
| 9.3.6. Wnioski z przykładu | 300 |

| | |
|---|-----|
| 10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI | 302 |
| 10.1. Komentarze do obliczeń probabilistycznych | 303 |
| 10.2. Komentarze dotyczące modelowania zmienności parametrów losowych problemu inżynierskiego w czasie | 306 |
| 10.3. Zalecenia dla projektantów i eksperymentatorów w dziedzinie inżynierii lądowej | 308 |
| BIBLIOGRAFIA | 311 |
| Streszczenie w języku polskim | 327 |
| Streszczenie w języku angielskim | 329 |

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI, OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

Symbole i oznaczenia

| | |
|-------------------------------------|---|
| A_i | – pole powierzchni przekroju poprzecznego i -tego elementu konstrukcji |
| b | – szerokość konstrukcji lub jej elementu |
| b_0, b_p, b_{ii}, b_{ij} | – współczynniki kierunkowe powierzchni odpowiedzi – kolejno: stały, stopnia pierwszego (liniowy) oraz stopnia drugiego, kwadratowy główny i kwadratowy krzyżowy |
| $C(t)$ | – wielkość ubytku korozyjnego w czasie t od początku użytkowania konstrukcji |
| $D[X]$ | – odchylenie standardowe zmiennej losowej X |
| E | – moduł sprężystości podłużnej Younga |
| $E[X]$ | – wartość oczekiwana zmiennej losowej X |
| F | – globalne zdarzenie związane z awarią konstrukcji |
| $F_X(x)$ | – dystrybuanta (funkcja rozkładu prawdopodobieństwa) zmiennej losowej X |
| f_u | – wytrzymałość na rozciąganie stali |
| $f_X(x)$ | – funkcja rozkładu gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej X |
| $f_X(\mathbf{x})$ | – łączna funkcja rozkładu gęstości prawdopodobieństwa n zmiennych losowych |
| f_y | – granica sprężystości stali |
| G | – obciążenie stałe |
| $G(\mu;\beta), G_{(\mu;\beta)}$ | – zmienna losowa o rozkładzie wg Gumbela, o parametrze lokalizacji równym μ oraz parametrze skali równym β |
| $g(\mathbf{X})$ | – uogólniona losowa funkcja graniczna (awaryjna) |
| H | – wysokość całkowita konstrukcji lub jej elementu |
| $I_{0/1}$ | – dwupunktowa funkcja charakterystyczna metody Monte Carlo |
| i | – liczba warstw, na które rozdzielana jest n -wymiarowa przestrzeń losowa |
| J_{MC} | – estymator prawdopodobieństwa awarii wg metody Monte Carlo |
| $LN(\mu;\sigma), LN_{(\mu;\sigma)}$ | – zmienna losowa o rozkładzie logarymiczno-normalnym (<i>log-normal</i> , LN), o wartości średniej równej μ i odchyleniu standardowym równym σ |
| l | – długość konstrukcji lub jej elementu |
| M | – zmienna losowa marginesu bezpieczeństwa konstrukcji |
| M_i | – moment zginający panujący w i -tym elemencie konstrukcji |
| m | – liczba realizacji brana pod uwagę w procesie osiągnięcia zbieżności oszacowania |
| N, NS | – liczebność populacji (całkowita liczba próbek losowych w całości analizy modelu numerycznego konstrukcji) |
| N_i | – siła normalna (osiowa) panująca w i -tym elemencie konstrukcji |
| N_{max} | – ustalona maksymalna liczba próbek poddawana analizie w eksperymencie numerycznym |

| | |
|---|---|
| N_{multi} | – ustalona maksymalna liczba próbek w pojedynczej analizie multiplikatywnej |
| $N(\mu; \sigma), N_{(\mu; \sigma)}$ | – zmienna losowa o rozkładzie normalnym wg Gaussa (<i>normal</i> , N), o wartości średniej równej μ i odchyleniu standardowym równym σ |
| n | – liczba zmiennych losowych wyróżnionych w analizie konstrukcji |
| n_{dof} | – liczba stopni swobody w zbiorze danych metodologii RSM |
| n_f | – liczba próbek losowych w całości populacji, dla których konstrukcja inżynierska uległa awarii |
| n_{norm} | – współczynnik normalizacyjny |
| P | – obciążenie punktowe (skupione) |
| $P(A)$ | – prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia losowego A |
| P_f | – prawdopodobieństwo awarii konstrukcji (zawodność, awaryjność) |
| P_s | – prawdopodobieństwo braku awarii konstrukcji (bezawaryjność) |
| Q | – obciążenie zmienne |
| q | – obciążenie równomiernie rozłożone |
| R^2 | – współczynnik determinacji dla aproksymacji liniowej określonej metodą najmniejszych kwadratów (<i>Least Square Method</i> , LSM) |
| $R \equiv X_R$ | – zmienna losowa reprezentująca całkowitą wytrzymałość materiałów konstrukcyjnych |
| $r_{corr,i}$ | – losowo wygenerowana wartość straty korozyjnej wymiaru przekroju poprzecznego i -tego elementu konstrukcji |
| r_I | – grubość (promieniowa) warstwy szadzi (oblodzenia) |
| $r_{y x_i}$ | – estymator współczynnika korelacji liniowej (<i>Linear Correlation Estimator</i> , LCE) |
| $S \equiv X_S$ | – zmienna losowa reprezentująca całkowitą sumę obciążeń konstrukcji |
| S_X | – skośność funkcji gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej X |
| T_i | – siła rozciągająca panująca w i -tym ciągnie (kablu) konstrukcji |
| T_R | – okres powrotu ekstremalnego obciążenia wiatrem |
| t | – czas progresji korozji konstrukcji |
| t_0 | – czas (okres) trwałości ochrony antykorozyjnej (powłoki malarskiej) konstrukcji |
| t_e | – czas eksploatacji konstrukcji korodującej |
| t_i | – temperatura montażu lub eksploatacji i -tego ciągu (kabla) konstrukcji |
| t_t | – dyskretny krok czasowy |
| $U_{(a;b)}$ | – zmienna losowa o rozkładzie równomiernym (<i>uniform</i> , U), o parametrach początku i końca przedziału równych odpowiednio a i b |
| u_{lim} | – graniczna dopuszczalna wartość przemieszczenia |
| u_x, u_y | – pomierzone przemieszczenia poziome konstrukcji lub jej elementu |
| u_z | – pomierzone przemieszczenie pionowe konstrukcji lub jej elementu |
| $V[X]$ | – wariancja zmiennej losowej X |
| v_W | – wartość liczbowa prędkości wiatru |
| $W(k; \lambda; \theta), W_{(k; \lambda; \theta)}$ | – zmienna losowa o rozkładzie wg Weibulla, o parametrze kształtu równym k , parametrze skali równym λ oraz parametrze lokalizacji równym θ |

| | |
|-----------------------|---|
| $w_i = P(x_i)$ | – waga próbki z l -tej podprzestrzeni losowej, tj. mnożnik wartości próbki losowej biorący pod uwagę prawdopodobieństwo wystąpienia danej wartości |
| w_u, w_σ | – liniowy zapas bezpieczeństwa, odpowiednio dla SGU i SGN |
| X | – zmienna losowa |
| \mathbf{X} | – wektor losowy n zmiennych losowych |
| X_d | – wartość obliczeniowa zmiennej losowej X |
| X_k | – wartość charakterystyczna zmiennej losowej X |
| x | – pojedyncza wartość liczbową zmiennej losowej X |
| \mathbf{x} | – realizacja (wektora losowego), tj. uporządkowany zbiór pojedynczych wartości liczbowych n zmiennych losowych (także: symulacja, próbka losowa) |
| $\hat{\mathbf{x}}$ | – dyskretny zbiór punktów osadzony w n -wymiarowej przestrzeni odpowiedzi reprezentujący z pewną ustaloną dokładnością zbiór punktów \mathbf{x} w n -wymiarowej wyjściowej przestrzeni realizacji zmiennych losowych \mathbf{X} |
| x_-, x_+ | – pulsy, tj. realizacje elementarne rozpatrywane w metodzie estymacji punktowej (<i>Point Estimate Method</i> , PEM) |
| Y | – zmienna losowa odpowiedzi konstrukcji |
| y | – pojedyncza wartość liczbową zmiennej losowej odpowiedzi konstrukcji |
| \hat{y} | – wartość liczbową przybliżająca z pewną ustaloną dokładnością wartość rzeczywistej odpowiedzi konstrukcji y |
| $\hat{y}(\mathbf{X})$ | – równanie powierzchni odpowiedzi konstrukcji – pierwszego rzędu (indeks $_{1or}$) lub drugiego rzędu (indeks $_{2or}$) |
| Z | – standaryzowana (jednostkowa) zmienna losowa |
| α | – pojedyncza wartość wskaźnika wrażliwości konstrukcji |
| \mathbf{a} | – wektor kierunkowy (globalny) wskaźnika wrażliwości w przestrzeni losowej |
| α_X | – wskaźnik wrażliwości zmiennej losowej X |
| $ \alpha_X $ | – znormalizowana wartość wskaźnika wrażliwości zmiennej losowej X |
| β | – pojedyncza wartość wskaźnika niezawodności konstrukcji |
| $\boldsymbol{\beta}$ | – wektor kierunkowy (globalny) wskaźnika niezawodności w przestrzeni losowej |
| β_0 | – docelowa, wymagana przez daną normę projektową, wartość wskaźnika niezawodności |
| β_C | – wskaźnik niezawodności liniowy, obliczany techniką Cornella |
| β_{HL} | – wskaźnik niezawodności nieliniowy, obliczany techniką Hasofera–Linda |
| β_{HLRF} | – wskaźnik niezawodności nieliniowy Hasofera–Linda, obliczany techniką iteracyjną Rackwitz–Fiesslera |
| $\Gamma(f)$ | – funkcja gamma |
| γ_{fi} | – częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla i -tej zmiennej losowej |
| δ | – delta Diraca |
| ε | – szacunkowy statystyczny (numeryczny) błąd eksperymentalny |

| | |
|-----------------------------------|--|
| ε_{alg} | – błąd własny działania algorytmu szacującego |
| ε_{MA} | – dopuszczalny brak zbieżności rozwiązania w kryterium średniej ruchomej |
| ε_{ref} | – błąd oszacowania danej wartości względem wartości referencyjnej |
| κ_X | – kurtoza funkcji gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej X |
| $\mu_X \equiv \bar{X}$ | – wartość średnia zmiennej losowej X |
| ν | – liczba Poissona |
| ν_X | – współczynnik zmienności zmiennej losowej X |
| σ_{red} | – naprężenia normalne (zredukowane) panujące w danym elemencie lub węźle konstrukcji |
| σ_X | – odchylenie standardowe zmiennej losowej X |
| $\Phi^{-1}(\bullet)$ | – funkcja odwrotna dystrybuanty rozkładu normalnego standaryzowanego |
| $\Phi_X(x)$ | – dystrybuanta (funkcja rozkładu prawdopodobieństwa) standaryzowanej zmiennej losowej X |
| ϕ | – średnica elementu konstrukcji |
| $\varphi(t)$ | – funkcja (całka) błędów Laplace'a |
| $\varphi_X(x)$ | – funkcja rozkładu gęstości prawdopodobieństwa standaryzowanej zmiennej losowej X |
| $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ | – pomierzone sztywne obroty konstrukcji lub jej elementu |
| Ω | – n -wymiarowa przestrzeń losowa (realizacji zmiennych losowych) |
| Ω_f | – obszar niebezpieczny (<i>failure domain, f</i>) w przestrzeni realizacji zmiennych losowych Ω |
| Ω_L | – warstwa, tj. rozłączna podprzestrzeń (w całkowitej liczbie wynoszącej L) n -wymiarowej przestrzeni losowej Ω |
| Ω_s | – obszar bezpieczny (<i>safe domain, s</i>) w przestrzeni realizacji zmiennych losowych Ω |
| ω_X | – niepewność zmiennej losowej X |

Skróty

| | |
|-------|--|
| AAT | – ocena wrażliwości konstrukcji na zmianę wszystkich jej parametrów modyfikowanych jednocześnie (<i>All-At-A-Time</i>) |
| ANN | – sztuczne sieci neuronowe (<i>Artificial Neural Networks</i>) |
| ANOVA | – tabelaryczna technika analizy wariancji konstrukcji (<i>Analysis of Variance</i>) |
| AS | – próbkowanie adaptacyjne (<i>Adaptive Sampling</i>) |
| ASD | – projektowanie według kryterium spełnienia wytycznych stanu naprężeń dopuszczalnych (<i>Allowable Stress Design</i>) |
| CMCS | – próbkowanie surowe (<i>Crude Monte Carlo Sampling</i>) |
| CRSM | – kombinowana metoda powierzchni odpowiedzi, propozycja autorska (<i>Combined Response Surface Method</i>) |
| CS | – próbkowanie kombinowane (<i>Combined Sampling</i>) |
| DA | – analiza różnicowa (<i>Differential Analysis</i>) |
| DOE | – projektowanie i kontrola eksperymentów numerycznych obciążonych niepewnościami (<i>Design Of Experiments</i>) |

| | |
|-----------|--|
| DPM | – metoda punktu projektowego (<i>Design Point Method</i>) |
| DS | – próbkowanie ukierunkowane (<i>Directional Sampling</i>) |
| DSA | – różnicowa analiza wrażliwości konstrukcji (<i>Differential Sensitivity Analysis</i>) |
| EP-SS | – próbkowanie warstwowe o równych prawdopodobieństwach (<i>Equal Probability Stratified Sampling</i>) |
| ES-SS | – próbkowanie warstwowe o jednorodnym uwarstwieniu (<i>Equal Stratification Stratified Sampling</i>) |
| FA | – analiza czynnikowa (<i>Factorial Analysis</i>) |
| FAST | – analiza wrażliwości techniką amplitudy Fouriera (<i>Fourier Amplitude Sensitivity Test</i>) |
| FEM | – metoda elementów skończonych (<i>Finite Element Method</i>) |
| FORM/SORM | – metody analizy niezawodności pierwszego/drugiego rzędu (<i>First/Second Order Reliability Methods</i>) |
| FOSM | – metoda probabilistyczna pierwszego rzędu drugiego momentu (<i>First Order Second Moment</i>) |
| GA | – algorytmy genetyczne (<i>Genetic Algorithms</i>) |
| HA | – podejście histogramowe (<i>Histogram Approach</i>) |
| IF | – wagi czynników sterujących wrażliwością (<i>Importance Factors</i>) |
| IS | – próbkowanie wagowe/ważone (<i>Importance Sampling</i>) |
| ISO | – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (International Organization for Standardization) |
| KDEM | – metoda estymacji gęstości jądra próbkowania (<i>Kernel Density Estimation Method</i>) |
| LCE | – estymator współczynnika korelacji liniowej (<i>Linear Correlation Estimator</i>) |
| LHS | – próbkowanie hipersześcianem łacińskim (<i>Latin Hypercube Sampling</i>) |
| LP | – programowanie liniowe (<i>Linear Programming</i>) |
| LR | – ocena wrażliwości konstrukcji techniką regresji liniowej (<i>Linear Regression Analysis</i>) |
| LRFD | – projektowanie współczynników obciążeń i wytrzymałości (<i>Load and Resistance Factor Design</i>) |
| LS | – próbkowanie liniowe (<i>Line Sampling</i>) |
| LSM | – metoda najmniejszych kwadratów (<i>Least Square Method</i>) |
| MA | – kryterium zbieżności wg średniej ruchomej (<i>Moving Average</i>) |
| MC, MCM | – metoda Monte Carlo (<i>Monte Carlo Method</i>) |
| MCMC | – metoda Monte Carlo wykorzystująca tworzenie łańcuchów Markova (<i>Markov Chain Monte Carlo Method, MCMC</i>) |
| MES | – metoda elementów skończonych (<i>Finite Element Method, FEM</i>) |
| MVFO | – metoda wartości średniej pierwszego rzędu (<i>Mean Value First Order</i>) |
| NRSA | – analiza czułości zakresu nominalnego (<i>Nominal Range Sensitivity Analysis</i>) |
| OAT | – ocena wrażliwości konstrukcji na zmianę pojedynczego modyfikowanego parametru (<i>One-At-A-Time</i>) |
| PCE | – metoda rozwinięcia w chaos wielomianowy (<i>Polynomial Chaos Expansion</i>) |
| PEM | – metoda estymacji punktowej (<i>Point Estimate Method</i>) |

| | |
|--------|--|
| PKN | – Polski Komitet Normalizacyjny |
| PN-EN | – Polska Norma wprowadzająca (metodą tłumaczenia) normę europejską (<i>European Norm</i> , EN) |
| RA | – analiza niezawodności (<i>Reliability Analysis</i>) |
| RC | – klasa niezawodności (<i>Reliability Class</i>) |
| RL | – poziom niezawodności (<i>Reliability Level</i>) |
| RSM | – metoda powierzchni odpowiedzi (<i>Response Surface Method</i>) |
| RSS | – ulepszone próbkowanie warstwowe (<i>Refined Stratified Sampling</i>) |
| SA | – analiza wrażliwości (<i>Sensitivity Analysis</i>) |
| SCA | – analiza chmur rozproszenia wyników (<i>Scatter Clouds Analysis</i>) |
| SFEM | – stochastyczna metoda elementów skończonych (<i>Stochastic Finite Element Method</i>) |
| SGN | – stan graniczny nośności (<i>Ultimate Limit State</i> , ULS) |
| SGS | – stan graniczny stateczności (<i>Buckling Limit State</i> , BLS) |
| SGU | – stan graniczny użyteczności (<i>Serviceability Limit State</i> , SLS) |
| SI | – wskaźniki wrażliwości (<i>Sensitivity Indices</i>) |
| SRS | – proste próbkowanie losowe (<i>Simple Random Sampling</i>) |
| SS | – próbkowanie warstwowe (<i>Stratified Sampling</i>) |
| SubSim | – symulacja podzbiorowa oraz związany z nią sposób generacji próbek, tzw. próbkowanie podzbiorowe (<i>Subset Simulation</i>) |
| TA | – podejście wyznaczania stycznej do odpowiedzi, podejście stycznej (<i>Tangential Approach</i>) |
| TRS | – próbkowanie losowe celowane (<i>Targeted Random Sampling</i>) |
| VRT | – techniki redukcji wariancji (<i>Variance Reduction Techniques</i>) |

OD AUTORA

Monografię tę dedykuję w pierwszej kolejności moim najukochańszym Synom, Janowi i Jakubowi – za to, że cały czas nieustrudzenie pokazują mi, co jest w życiu najważniejsze.

Dedykuję ją również mojej Żonie, moim Rodzicom i całej mojej Rodzinie – za okazwane codziennie wsparcie, udzielaną pomoc, za wiarę w powodzenie moich działań oraz za zrozumienie, dlaczego czasem moje myśli w prozaicznych sytuacjach uciekają ku symulowanemu i numerycznemu chaosowi.

Dziękuję wyjątkowo serdecznie prof. Jarosławowi Górskiemu, mojemu Mentorowi – za wprowadzenie w nieodgadniony świat zawodności i niebezpieczeństwa konstrukcji inżynierskich.

Przekazuję wyrazy uznania dla prof. Urszuli Radoń, prof. Jacka Szafrana i prof. Waldemara Magdy – za nieocenioną pomoc w końcowym kształtowaniu niniejszej monografii.

Kłaniam się uprzejmie wszystkim Współpracownikom, z którymi miałem i mam przyjemność pracować, a zwłaszcza Koleżeństwu z Katedry Mechaniki Budowli Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej – za dopingowanie i wspieranie procesu tworzenia się monografii.

Składam serdeczne podziękowania moim Dyplomantom, którzy przez wiele lat podejmowali ze mną pasjonujące wyzwania i rozważali problemy inżynierii lądowej – w szczególności p. Joannie Sikorze i p. Josemu Boschowi Llufriu, których analizy wstępne zostały rozwinięte i uzupełnione w niniejszej rozprawie.

Dziękuję również p. Jimowi Wardowi, p. Cedricowi Bixlerowi Zavali i p. Omarowi Rodriguezowi Lópezowi – za cierpliwe kreowanie niezwykle pomocnej ścieżki dźwiękowej do procesu powstawania mojej pracy.

Końcowo, monografię tę dedykuję – i niniejszym za nią dziękuję – Losowi.

PRZEDMOWA

W pierwowzorze encyklopedii, epokowym dziele *Historia naturalis*, Gajusz Pliniusz Drugi, zwany Starszym, historyk, pisarz i myśliciel rzymski z pierwszego wieku naszej ery, zapisał w księdze drugiej, w wersecie piątym: „certu sit nihil esse certi” („niechże będzie pewne, iż nic nie jest pewne”^{*}).

I choć słowa te odnoszą się do człowieczeństwa w sensie ogólnym, to konstrukcje inżynierskie, jako świadomy i celowy wytwór człowieka, doskonale się do tej mądrości dopasowują i w pełni jej podlegają. Proces projektowania w inżynierii lądowej zależy od ogromnej liczby czynników niepewnych i losowych, które tylko w niewielkim stopniu dają się przewidzieć i odpowiednio rozpoznać. Większość działań inżynierskich, choć wspomina się o tym rzadko, dbając o spokojny sen odbiorców końcowych konstrukcji, jest prowadzona w warunkach znaczącej niepewności, którą inżynier w sposób umiejętny i świadomy musi umieć ująć.

I tak jak człowiek, rzucany w czasy wybitnie niepewne, może się ugiąć, załamać, zatracić się w całej tej złożoności, tak i konstrukcja inżynierska może na tę niepewność odpowiedzieć w różny sposób. Jednak z jednym wyjątkiem, w którym to twórca musi być lepszy od twórcy – konstrukcja nie może się poddać i na wszelkie źródła zmienności musi bezwarunkowo odpowiadać wyłącznie określonym, wysokim bezpieczeństwem i należytą niezawodnością oraz wypełniać bezawaryjnie swoje przeznaczenie przez cały planowany okres użytkowania.

Na przestrzeni wieków inżynierowie udowodnili swoją sprawność w opisywaniu i poznawaniu całej otaczającej nas niepewności. To, co rozpoczęło się budowaniem niemal eksperymentalnym, często na zasadzie metody prób i błędów, dzisiaj jest szeregiem ukierunkowanych, doskonale opisanych i skodyfikowanych prostych technik oraz metod zapewniania bezpieczeństwa konstrukcji. Efektem takiego prawidłowego działania inżynierskiego jest w dzisiejszych czasach wykonanie projektu, który zredukuje wpływ niepewności w największym możliwym stopniu. Należy bowiem pamiętać, że sytuacja idealna, polegająca na całkowitym wyeliminowaniu tego wpływu, pozostaje nadal w sferze inżynierskich marzeń, a w większości przypadków przy obecnym stanie wiedzy jest niemożliwa.

W pogoni za marzeniem okiełznania niepewności inżynierowie sami zbudowali sobie nieocenionego, potężnego sojusznika i asystenta – komputer. Najpierw jego podzespoły służyły tylko do magazynowania danych i szybkiego ich przeglądania, jednak wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputera inżynierowie posiadli możliwość importowania tych danych bezpośrednio do modeli obliczeniowych konstrukcji, a następnie – wykonywania na ich podstawie newralgicznych obliczeń oraz otrzymywania kluczowych wyników. Na bazie analizy wyselekcjonowanych, najistotniejszych sytuacji obliczeniowych zaczęto uzyskiwać pewne i niezawodne projekty.

To jednak również okazało się niewystarczające dla inżynierów. Zachęceni sukcesami, prowokowali dalszy rozwój maszyn liczących. Najpierw dał on możliwość analizowania

* Tłumaczenie własne autora.

ogromnej liczby przypadków projektowych i obciążeniowych dla jednego rozpatrywanego modelu numerycznego konstrukcji bez konieczności szukania odpowiednio zawężonego, krytycznego zakresu obliczeń. Następnie powtarzalne obliczenia zaczęły zyskiwać na szybkości wykonania, łamiąc kolejne bariery stojące przed ich regularnym stosowaniem. W końcu osiągnięto upragnioną możliwość obliczania odpowiedzi konstrukcji o niemal nieograniczonym zakresie dla dowolnie wielkiej liczby podobnych do siebie modeli, których niewielkie różnice zaczęły dość wiernie naśladować możliwe do zaistnienia niepewności i losowości. Inżynieria wkroczyła w erę symulacji numerycznych.

Dzisiaj komputery potrafią w krótkiej chwili przeprowadzić miliony zbliżonych obliczeń, próbując przewidzieć wszystkie możliwe stany, w których może się znaleźć konstrukcja. W ciągu kilku sekund jej komputerowy model może doświadczyć warunków letnich lub zimowych, porywistego wiatru, śnieżyicy lub nieznośnego upału. Jego udziałem może być osłabienie materiału, z którego wykonane są elementy konstrukcji, lub przemieszczenie jej podparć. Siedzący przez komputerem inżynier może w ułamku sekundy zagwarantować doskonałość wszystkich elementów modelu, by za moment jednym kliknięciem rozwiązać wszelkie możliwe poziomy jego imperfekcji. Konstrukcja, niczym kot Schroedingera, w jednej chwili znajduje się w pierwszej sekundzie, a w drugiej po stu latach użytkowania, jest „spod igły”, a także udręczona korozją i upływem czasu. Obecnie inżynier konstruktor, prowadząc szybkie, powtarzalne obliczenia, może precyzyjnie wskazać liczbę scenariuszy niebezpiecznych dla konstrukcji i mechanizmy jej zniszczenia pośród miliona generacji analizowanego modelu numerycznego. Może on się znaleźć w centrum multiwersum istnienia konstrukcji inżynierskiej.

Ostatecznie, za pomocą określonych technik matematycznych, którym przyświeca od lat 50. ubiegłego stulecia nazwa monakijskiego kasyna (notabene doskonale obrazująca ryzykowny cień, jaki niepewności rzucają na konstrukcję inżynierską), inżynier może przedstawić kompletny, bezdyskusyjny obraz niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji.

Żadne podejście, nawet najsprawniejsze i do granic intuicyjne, nie jest jednak bez wad. W nieprzeniknionej liczbie symulacji można się łatwo zgubić, utonąć w ich wynikach niczym w morzu, tracąc sprzed oczu rozwiązywany problem. Dzisiaj kluczową umiejętnością staje się więc nie zaplanowanie ogromnego, nieskrępowanego zakresu obliczeń, a dobranie takiego zestawu uproszczeń, które pozwolą na optymalizację jego kosztu i nakładu, przy równoczesnym uzyskaniu oszacowania odpowiedzi oraz bezpieczeństwa konstrukcji o należytej jakości. Pozostając w marynistycznych analogiach, dzisiaj poszukuje się takich obszarów tego morza obliczeń, na których zarzucenie sieci daje szansę na odpowiednio obfity połów.

Niniejsza monografia jest w pełni poświęcona wspomnianym powyżej technikom symulacyjnym szacowania niezawodności konstrukcji inżynierskich. Jej nadrzędne cele obejmują „wyciągnięcie pomocnej dłoni” do adeptów inżynierii lądowej oraz stworzenie pola do polemiki dla naukowców, projektantów i praktyków konstrukcji zaznajomionych z tematem.

Rozprawa stanowi przede wszystkim naturalne rozwinięcie pracy doktorskiej autora. Czerpie ona z podstaw wypracowanych w trakcie powstawania dysertacji, z przywołanych tam opisów technik, rozwiniętych algorytmów i opracowanego programu autorskiego. Jest kontynuacją, a w pewnym sensie także weryfikacją i walidacją osiągnięć pracy doktorskiej,

jak również krokiem naprzód w kierunku wytyczonym w jej wnioskach końcowych, w szczególności w stronę rozwoju nowatorskich procedur.

Ponadto niniejsza monografia prezentuje możliwość udanej implementacji prostych uniwersalnych technik symulacyjnych w analizie niezawodności konstrukcji inżynierskich lekkich, wykazuje zasadność ich stosowania, przedstawia możliwości łączenia różnych technik w serie i algorytmy obliczeniowe oraz wskazuje te z nich, które w łatwy sposób prowadzą do prawidłowych wyników. Nie ma natomiast na celu zaprezentowania gotowych, zamkniętych, uniwersalnych rozwiązań, gdyż uważa się, że w metodach symulacyjnych takich rozwiązań po prostu nie ma – różne techniki mogą działać z różną skutecznością dla różnych przypadków analizy, a dopasowanie ich do rozważanego problemu jest samo w sobie odrębną cenną umiejętnością.

W niniejszej monografii postuluje się syntezę trzech standardowych technik symulacyjnych w jeden proces numeryczny oferujący korzystającemu z niego inżynierowi wyniki o zadowalającym poziomie ufności, uzyskane przy względnie niewielkim nakładzie obliczeniowym. Na tej podstawie proponuje się algorytm postępowania w przypadku konieczności oszacowania niezawodności jako niebezpiecznie zależnej od czasu (tj. zmieniającej się w czasie w sposób niekorzystny, spadającej w czasie eksploatacji poniżej wartości dopuszczalnych). Algorytm ten ma być pomocny dla użytkowników i operatorów konstrukcji w planowaniu czasu wykonywania możliwych napraw lub odnawiania zabezpieczeń przed spadkiem nośności lub ograniczeniem użyteczności konstrukcji inżynierskich.

Dzięki – między innymi – symulacjom numerycznym niepewności nie muszą już być nieprzewidywalne, nie są już wrogiem, a dobrze poznanym i zrozumianym adwersarzem. Nie stajemy przed niepewnościami, jedynie ślepo licząc na łaskawość losu, a umiemy zmusić je w naszym inżynierskim kasynie do grania naszymi znaczącymi kartami.

Podsumowując, raz jeszcze można zajrzeć na karty otwierającej tę przedmowę encyklopedii *Historia naturalis* Pliniusza Starszego. W księdze siódmej, w wersecie szóstym pyta on retorycznie: „Aut quid non miraculo est, cum primum in notitiam venit? Quam multa fieri non posse prius quam sunt facta iudicantur?” („Azaliż, czy jest coś, co nie wydaje się cudowne, gdy poznamy to po raz pierwszy? Ile rzeczy wydaje się całkiem niemożliwe, dopóki nie zostaną urzeczywistnione i zrozumiałe?”**). Nie ma piękniejszej dewizy dla nauki. Nie ma lepszego motta dla dzisiejszego postępu inżynierii konstrukcyjnej. Napotkane problemy inżynierskie muszą ciekawić, wprowadzać w zachwyt, zmuszać do myślenia, a następnie inspirować rozwiązania, ustawicznie poszerzać wiedzę na temat konstrukcji inżynierskich i umożliwiać coraz to większe osiągnięcia myśli technicznej. Techniki symulacyjne doskonalnie wpisują się w plan realizacji tego celu dzisiejszej inżynierii, na wielu jej polach.

I w ten oto sposób, choć minęły już dwa tysiąclecia, podczas których inżynierowie przeszli od działania na prostych abakusach do repetycyjnej numerycznej analizy konstrukcji na oprogramowaniu komputerowym ABAQUS, słowa Pliniusza Starszego nie straciły „ani litery” ze swojej aktualności.

** Tłumaczenie własne autora.