

Bogdan LIGAJ

## TABLICA KORELACYJNA NARZĘDZIEM DO MODELOWANIA OBCIĄŻEŃ W BADANIACH TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Tablica korelacyjna w układzie  $\sigma_{\min} - \sigma_{\max}$  jest narzędziem znajdującym zastosowanie w badaniach trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych. Właściwości tablic pozwalają na analizę obciążeń roboczych w zakresie oceny rozkładów wartości opisujących cykl obciążenia oraz na modelowanie obciążeń o różnym następstwie cykli w programie. W pracy zostały przedstawione pewne właściwości tablicy, pozwalające na opracowanie modelu obciążenia uwzględniającego udziały poszczególnych obciążeń roboczych w obciążeniu eksploatacyjnym.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny,  
al. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

### 1. WPROWADZENIE

Przebiegi obciążeń elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń roboczych wykazują różnorodny charakter zmian naprężeń w czasie, które zależą od wielu czynników natury probabilistycznej, związanych z warunkami eksploatacji, charakterem i dynamiką pracy, wpływem otoczenia, itp. Przykłady tego typu obciążeń można spotkać m.in. w pracach dotyczących konstrukcji lotniczych [6, 7], morskich [1] i pojazdów kołowych [2, 5].

W badaniach trwałości zmęczeniowej fragmentów konstrukcji inżynierskich stosowane są obciążenia eksploatacyjne lub programy obciążeń opracowane na podstawie modeli obciążenia. Przykładem wymienionego modelu jest tablica korelacyjna w układzie  $\sigma_{\min} - \sigma_{\max}$ , opracowana na podstawie wyników tzw. schematyzacji [4] obciążenia eksploatacyjnego.

Tablica korelacyjna w układzie  $\sigma_{\min} - \sigma_{\max}$  jest narzędziem używanym w badaniach trwałości zmęczeniowej [3, 9] do opisu (zapisu) obciążeń eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych maszyn. Jej budowa, właściwości i zastosowanie w badaniach zmęczeniowych zostały szeroko opisane w pracach [2, 10].

Jedną z istotnych właściwości tablic jest możliwość wykonywania na nich działań: dodawania, odejmowania, mnożenia i dzielenia [2, 9]. Pozwalają one na opracowanie modelu obciążenia eksploatacyjnego uwzględniającego udziały poszczególnych obciążeń roboczych. Sposób wykonywania działań zostanie omówiony w dalszej części pracy.

Celem pracy jest przedstawienie sposobu opracowywania modelu obciążenia eksploatacyjnego na podstawie obciążeń roboczych.

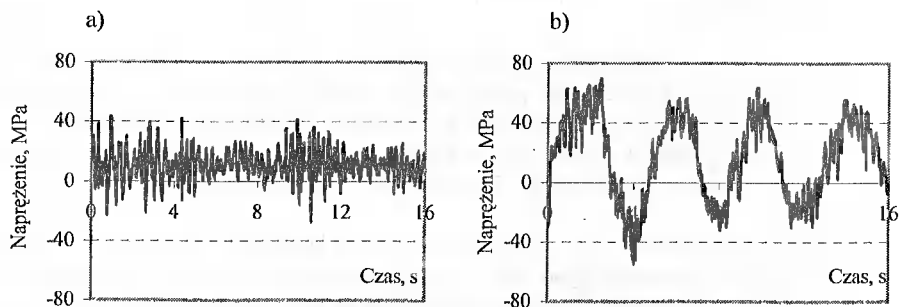
W pracy przedstawiono zagadnienia związane z wykonywaniem działań na tablicach korelacyjnych oraz oceną rozkładów wartości minimów, maksimów, średnich, amplitud oraz współczynnika asymetrii cyklu R w obciążeniu eksploatacyjnym.

## 2. MODEL OBCIĄŻENIA EKSPLOATACYJNEGO

### 2.1. Obciążenie robocze

Charakter i wartość obciążenia roboczego elementów samochodu zależą od wielu czynników, z których najważniejsze to: rodzaj nawierzchni drogi, masa i obciążenie pojazdu, prędkość jazdy i wykonywane manewry (przyspieszanie, hamowanie i skręty). Udział poszczególnych warunków dla populacji pojazdów jest zróżnicowany i wymaga odrębnej analizy, w tej pracy nie przeprowadzonej. Jednak należy zauważyć, iż określone warunki eksploatacji pojazdu mają różny wpływ na trwałość zmęczeniową jego elementów konstrukcyjnych, co związane jest z zakresem zmienności i charakterem obciążeń roboczych.

Dla zilustrowania zagadnień wynikających z tematu pracy przyjęto dwa przebiegi obciążeń czopa zwrotnicy, zarejestrowane podczas jazdy ze stałą prędkością po nawierzchni asfaltowej (rys. 1). Na rysunku 1a przedstawiono obciążenie robocze podczas jazdy na wprost, natomiast na rysunku 1b podczas jazdy z wykonywanymi na przemian manewrami skrętu w lewo i prawo. W celu pominięcia w dalszej części pracy stosowania długich opisów do identyfikacji obciążeń wprowadzono następujące oznaczenia: AU – dla przebiegu zarejestrowanego podczas jazdy na wprost, AM – dla przebiegu zarejestrowanego podczas jazdy z wykonywanymi manewrami skrętu.



Rys. 1. Fragment przebiegu obciążeń czopa zwrotnicy podczas jazdy: a) na wprost (AU), b) z wykonywanymi manewrami skrętu w lewo i prawo (AM)

Identyfikację podstawowych parametrów statystycznych przebiegów obciążeń przeprowadzono wykorzystując program komputerowy STATISTICA 7.1. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki oceny statystycznej

Przebieg	Wartość średnia	Wariancja	Odchylenie standardowe	Skośność	Kurtoza	Minimum	Maksimum	Rozstęp
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
AU	9,08	62,0	7,87	0,0532	1,0724	-28,9	43,8	72,7
AM	15,65	738,8	27,18	-0,1406	-1,2634	-54,9	69,9	124,8

W celu opracowania modelu obciążenia przebiegi AU i AM podzielono na przedziały klasowe o stałej szerokości równej 4 MPa. Uzyskano w ten sposób podział prze-



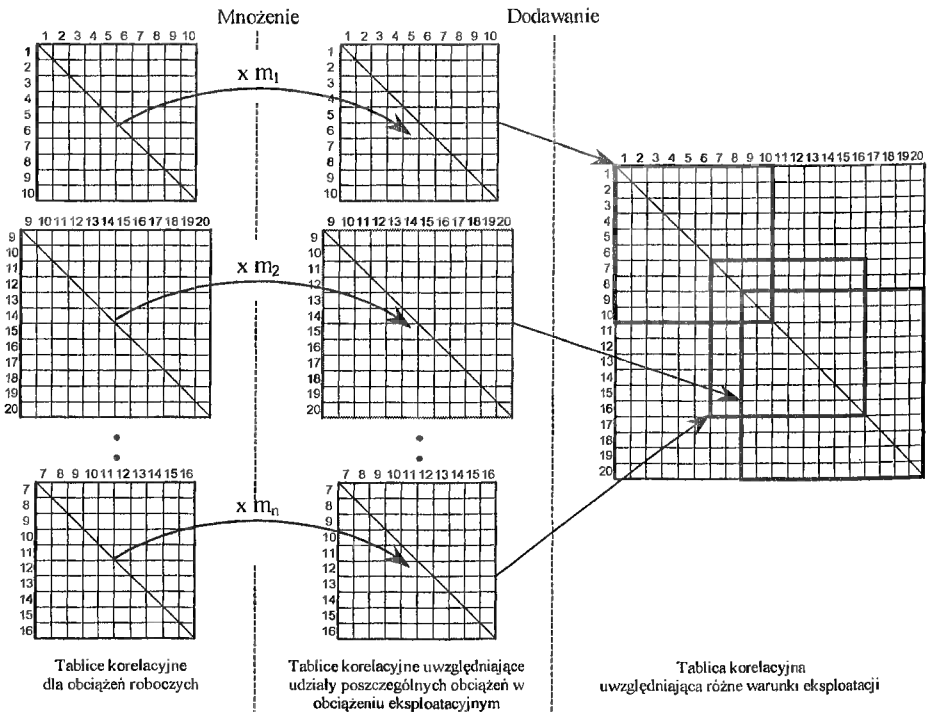
## 2.2. Złożone widmo obciążenia

Jedną z właściwości tablicy korelacyjnej, pozwalającą na opracowanie widma obciążenia uwzględniającego różne warunki eksploatacji, jest możliwość wykonywania działań: dodawania, odejmowania, mnożenia i dzielenia.

Dodawanie (odejmowanie) tablic polega na sumowaniu (odejmowaniu) liczb pól cykli mieszczących się w polu tablicy określonych wartościami  $\sigma_{\min}$  i  $\sigma_{\max}$ . Możliwość wykonywania działań wymaga, aby tablice posiadały taką samą szerokość przedziałów klasowych oraz dotyczyły tego samego rodzaju obciążenia (rozciąganie – ściskanie, zginanie, skręcanie).

Mnożenie (dzielenie) tablic polega na tym, iż każde pole tablicy korelacyjnej określone wartościami  $\sigma_{\min}$  i  $\sigma_{\max}$  zostanie pomnożone (podzielone) przez tę samą liczbę. Dane zawarte w tablicy korelacyjnej, opracowanej na podstawie obciążeń eksploatacyjnych spełniających warunki stacjonarności i ergodyczności, można pomnożyć przez dowolną liczbę całkowitą  $m$ . Działanie to jest równoważne z opracowaniem tablicy korelacyjnej na podstawie obciążeń, których pomiar został przeprowadzony w czasie  $m$  razy dłuższym (zwiększonym o taką samą liczbę co przyjęty mnożnik).

Wykorzystując przedstawione możliwości wykonywania działań na tablicach można opracować model obciążenia, odzwierciedlający eksploatacyjne warunki obciążenia elementu konstrukcyjnego. Sposób jego opracowania przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Sposób opracowania złożonego widma obciążenia

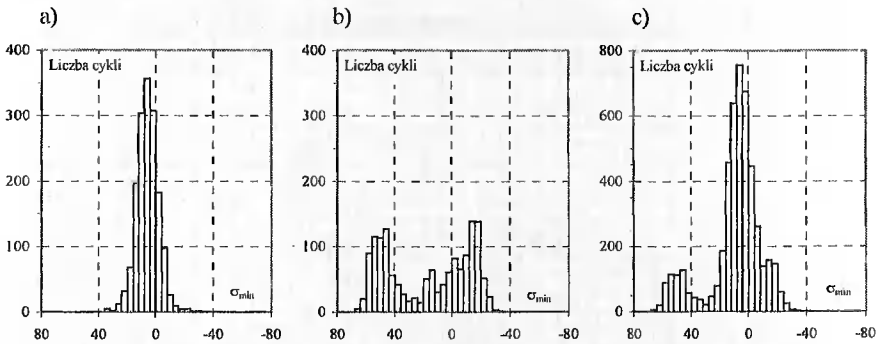


### 3. OCENA ROZKŁADÓW WARTOŚCI W TABLICY KORELACYJNEJ

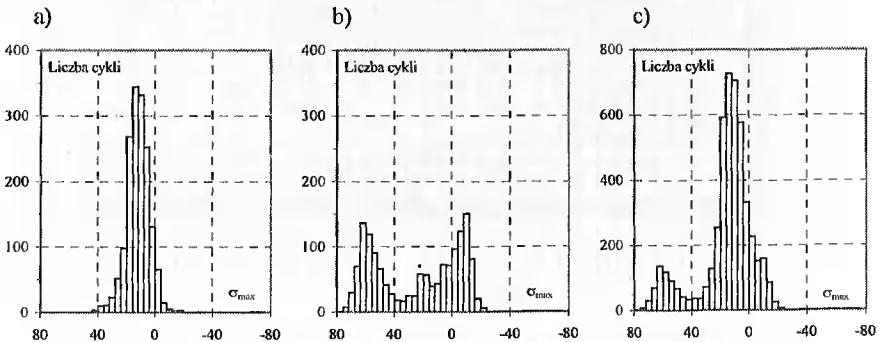
#### 3.1. Ocena rozkładów wartości minimów, maksimów, średnich i amplitud

Tablica korelacyjna pozwala na ocenę rozkładu wartości minimów, maksimów, średnich i amplitud, co związane jest z jej właściwościami. Pola leżące na liniach równoległych do linii CD charakteryzują się taką samą wartością średnią, a pola położone na liniach równoległych do linii AB posiadają taką samą wartość amplitudy. Sumując liczby półcykli z pól położonych wzdłuż kierunków wyznaczonych określonymi parametrami cyklu ( $\sigma_{m i}$ ,  $\sigma_{a i}$ ,  $\sigma_{min i}$ ,  $\sigma_{max i}$ ) w części gałęzi rosnących lub malejących można wyznaczyć rozkład wartości. Różnice w liczbie półcykli w części gałęzi rosnących i malejących wynikają z przyjętej metody schematyzacji i dotyczą kilku półcykli nie mających istotnego wpływu na rozkład wartości. Na tej podstawie rozkłady wartości półcykli dla jednej z części tablicy można uznać za rozkłady cykli w tablicy.

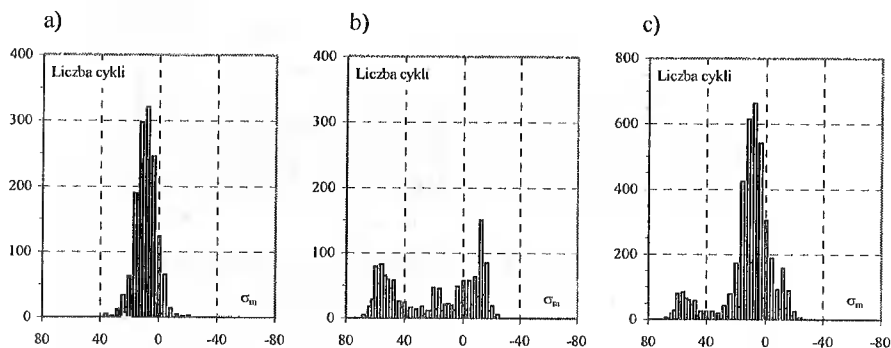
Dla zilustrowania przedstawionego zagadnienia wyznaczono rozkłady wartości minimów (rys. 5), maksimów (rys. 6), średnich (rys. 7) i amplitud (rys. 8) dla obciążeń AU, AM i AU(x2) + AM(x1).



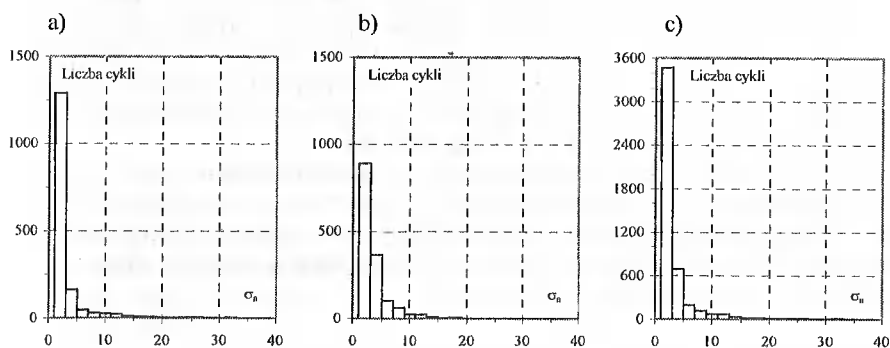
Rys. 5. Rozkłady wartości minimów dla obciążeń: a) AU, b) AM, c) AU(x2) + AM(x1)



Rys. 6. Rozkłady wartości maksimów dla obciążeń: a) AU, b) AM, c) AU(x2) + AM(x1)



Rys. 7. Rozkłady wartości średnich dla obciążeń: a) AU, b) AM, c) AU(x2) + AM(x1)

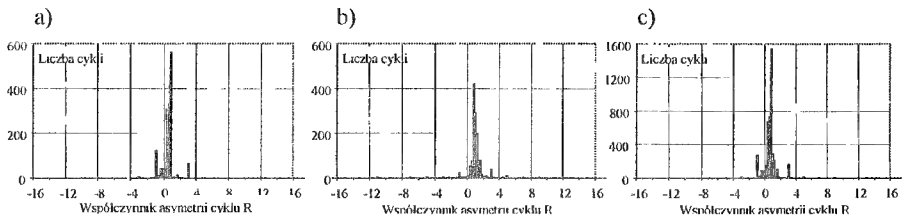


Rys. 8. Rozkłady wartości amplitud dla obciążeń: a) AU, b) AM, c) AU(x2) + AM(x1)

Pobieżna ocena wyznaczonych rozkładów wartości wskazuje, iż rozkład wartości minimów, maksimów i średnich dla obciążenia AU są zbliżone do rozkładu normalnego. Potwierdziła to ocena z zastosowaniem testu statystycznego zgodności  $\chi^2$ . W przypadku obciążenia AM rozkłady wartości przyjmują postać rozkładu dwumodalnego. Podobny charakter rozkładów, jak w przypadku obciążenia AU, uzyskano dla modelu obciążenia AU(x2) + AM(x1). Rozkłady wartości amplitud dla wszystkich analizowanych modeli obciążenia są zbliżone do rozkładu wykładniczego.

### 3.2. Ocena rozkładu wartości współczynnika asymetrii cyklu R

Tablica korelacyjna umożliwiła przeprowadzenie analizy obciążeń ze względu na współczynnik asymetrii cyklu R. Rozkłady wartości wymienionego współczynnika dla analizowanych obciążeń przedstawiono na rysunku 9 i na ich podstawie można stwierdzić, iż znacząca większość cykli mieści się w zakresie: dla obciążenia AU  $-1 < R < 0,9$ , dla AM  $-1,1 < R < 2,9$  i dla AU(x2) + AM(x1)  $-1,1 < R < 2,9$ . Najliczniejszą grupę w obciążeniu AU i AM stanowią cykle o współczynniku  $R \approx 0,7$ .



Rys. 9. Rozkłady wartości współczynnika R dla obciążeń: a) AU, b) AM, c) AU(x2) + AM(x1)

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w pracy sposób budowy modelu obciążenia eksploatacyjnego na podstawie obciążeń roboczych ma istotne znaczenie dla oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych. Pozwała na badanie wpływu wybranych obciążeń roboczych na trwałość oraz ocenę trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń eksploatacyjnych. Zastosowanie tablicy korelacyjnej w stanowiskowych badaniach zmęczeniowych wiąże się z opracowaniem programu obciążenia, którego sposób modelowania został przedstawiony w pracach [2, 3, 8].

Na podstawie danych w tablicy korelacyjnej można dokonywać oceny statystycznej obciążenia eksploatacyjnego, dotyczącej oceny rozkładu wartości minimum, maksimum, średnich i amplitud oraz współczynnika asymetrii cyklu R. Wymienione możliwości oceny, w dalszych pracach, posłużą do modelowania obciążeń charakteryzujących się odpowiednimi rozkładami wartości.

#### LITERATURA

- [1] Germanischer Lloyd Group, 1997. Fatigue Strength of Ship Structures, Hamburg.
- [2] Ligaj B., 2006. Analiza zastosowania tablic korelacyjnych w badaniach trwałości zmęczeniowej. Rozprawa doktorska, ATR w Bydgoszczy.
- [3] Ligaj B., 2007. Wpływ wybranych programów obciążeń wygenerowanych na podstawie tablicy korelacyjnej na trwałość zmęczeniową stali 18G2A. Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe 3(66), 129-146.
- [4] Norma ASTM: Standard Practices for cycle counting in fatigue analysis, ASTM Designation: E 1049-85 (Reapproved 1990).
- [5] Praca zbiorowa pod redakcją R.C. Rice, 1988. Fatigue Design Handbook. Second Edition, Society of Automotive Engineers, Warrendale.
- [6] Praca zbiorowa, 1979. Description of a Fighter Aircraft Loading Standard for Fatigue. Evaluation.
- [7] Praca zbiorowa, 1976. Fighter Aircraft Loading Standard for Fatigue. Flugzeugwerke Emmen, Switzerland.
- [8] Szala J., Ligaj B., 2005. Trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych. Problemy Eksploatacji – Zeszyty Naukowe 4(59), Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, 291-302.
- [9] Szala J., Ligaj B., 2000. Analiza obciążeń eksploatacyjnych w badaniach zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych za pomocą tablic korelacyjnych. XVIII Sympozjum Zmęczenie Materiałów i Konstrukcji, Bydgoszcz – Pieciszka, 465-473.
- [10] Szala J., Ligaj B., 2005. Tablice korelacyjne dla obciążeń eksploatacyjnych – budowa, właściwości i zastosowanie. Mat. konf. X Jubileuszowy Kongres Eksploatacja Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki, 531-541.