

Józef PRZYBYLSKI, Marek DYKIER, Jerzy TARA

Instytut Transportu i Komunikacji

METODY SYMULOWANIA OBCIĄŻEN EKSPLOATACYJNYCH  
W BADANIACH ZMĘCZENIOWYCH

Streszczenie. Długotrwałe i kosztowne zmęczeniowe badania eksploatacyjne można zastąpić przez badania laboratoryjne wykonywane według programu schodkowego. W artykule podano sposób opracowania programu schodkowego dla pojedynczego i złożonego przypadku obciążenia.

1. Wstęp

Obciążenia eksploatacyjne urządzeń mechanicznych mają w większości przypadków charakter losowy. Z tego względu określenie trwałości zmęczeniowej ich elementów na drodze analitycznej jest trudne, a uzyskane wyniki są mało dokładne. Jedynie stosując badania zmęczeniowe eksploatacyjne lub stanowiskowe można uzyskać wyniki wystarczające dla celów praktycznych. Biorąc jednakże pod uwagę długotrwałość i koszt badań eksploatacyjnych, stosuje się obecnie w większości przypadków zmęczeniowe badania laboratoryjne. Charakteryzuje je możliwość pracy bez przerwy, bez względu na warunki atmosferyczne i porę roku. Ponadto mogą być one realizowane według ściśle określonego, uprzednio ustalonego programu, wskutek czego uzyskane wyniki są w znacznym stopniu porównywalne.

Rozpowszechnione są następujące metody zmęczeniowych badań laboratoryjnych:

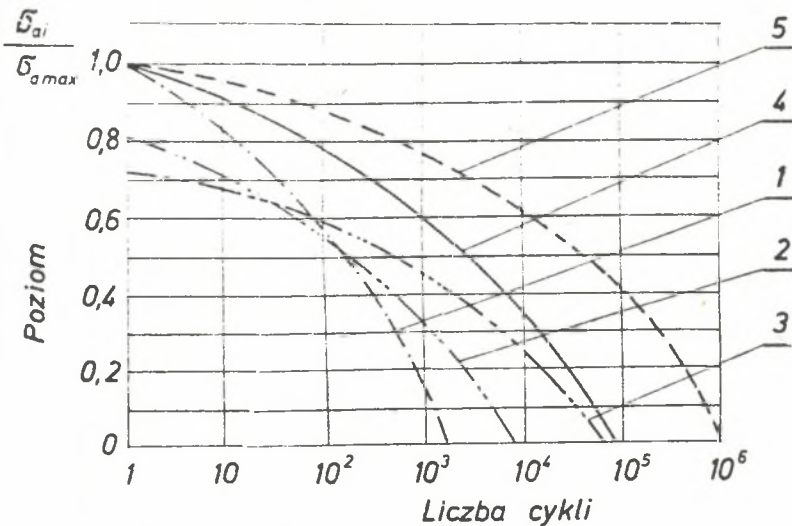
- a) badania przy stałej wartości amplitudy obciążeń,
- b) badania przy odtwarzaniu przebiegu obciążeń eksploatacyjnych, o amplitudach zmieniających się losowo,
- c) badania, w których rzeczywisty przebieg obciążeń eksploatacyjnych zastępuje się obciążeniami programowanymi.

Wyniki uzyskane w przypadku badań przy stałej amplitudzie są mało dokładne i mają jedynie charakter orientacyjny. Badania z odtwarzaniem przebiegu obciążeń eksploatacyjnych dają dokładne wyniki, jednakże wymagają skomplikowanych i kosztownych urządzeń sterujących pulsator maszyny wytrzymałościowej. Biorąc powyższe pod uwagę, do najczęściej spotykanych należy trzecia metoda, w której do sterowania maszyny wytrzymałościowej stosuje się tzw. program schodkowy. Charakteryzuje się on tym, że amplituda obciążeń jest stała jedynie podczas ściśle określonej liczby cykli, by następnie po jej wykonaniu przybrać inną, znowu stałą wartość, odpowiadającą

kolejnemu etapowi programu. Tego rodzaju program pozwala na znaczne uproszczenie urządzeń sterujących pulsatora. Uzyskane wyniki są wystarczająco dokładne, ponieważ charakter procesu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych nie wymaga pełnego odtwarzania przebiegu obciążeń eksploatacyjnych podczas badań. Wystarczającą dokładność uzyskuje się nawet przy założeniu, że wartość średniego naprężenia eksploatacyjnego jest stała ( $\sigma_m = \text{const}$ ). Jest to wprawdzie uproszczeniem, jednakże bez większego znaczenia praktycznego ponieważ na powstawanie i rozwój uszkodzeń zmęczeniowych ma przede wszystkim wpływ rozpiętość widma naprężeń.

## 2. Program schodkowy dla obciążenia pojedynczego

W przypadku, gdy w warunkach eksploatacyjnych rozpatrywany element jest poddany działaniu jednego, zmieniającego się losowo obciążenia, podstawą do opracowania programu schodkowego jest zapis przebiegu obciążeń, uzyskany przy użyciu jednego z kanałów rejestratora magnetycznego. Następnie, na podstawie wyników klasyfikacji wielkości amplitud wg przyjętego kryterium np. zliczania szczytów (maksimów i minimów) w danej klasie, przekroczenia klas itp. [1] uzyskuje się histogram (rys. 1). W przypadku, gdy urządzenie, w skład którego wchodzi rozpatrywany element, pracuje w różnych warunkach eksploatacyjnych, to dla każdego z nich sporządza się oddzielny

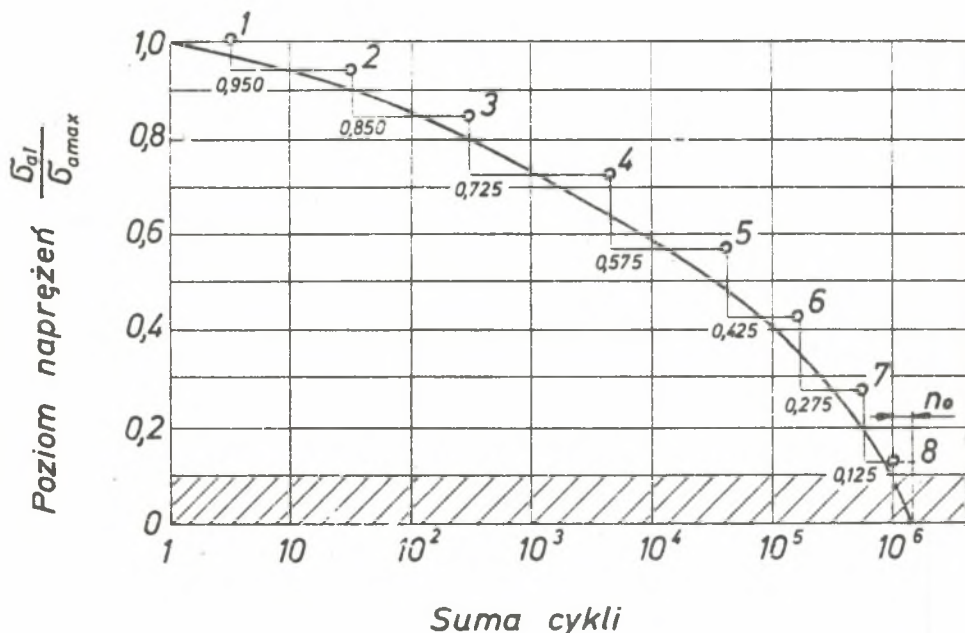


Rys. 1. Sposób wyznaczania histogramu wypadkowego

1,2,3 - histogramy dla różnych warunków eksploatacyjnych, 4 - histogram wypadkowy, 5 - histogram wypadkowy sprawdzony do  $10^6$  cykli

zapis przebiegu obciążeń, uzyskując w efekcie kilka odpowiadających im histogramów (rys. 1). Różnią się one między sobą liczbą zdarzeń i wartościami amplitud obciążeń. Następną czynnością jest złożenie histogramów w histogram wypadkowy, sprowadzony do unownej liczby cykli równej  $10^6$ . Uwzględnia się w ten sposób przez ekstrapolację te zdarzenia, które nie zostały uwidocznione w poszczególnych histogramach z powodu ograniczonego czasu zapisu. Czas wykonania próby można znacznie skrócić pomijając w programie małe amplitudy, tzn. takie, które są mniejsze niż 10% maksymalnej amplitudy, zmierzanej w warunkach eksploatacyjnych [2]. W tym celu należy zmodyfikować histogram wypadkowy w taki sposób, aby poziom amplitud naprężeń

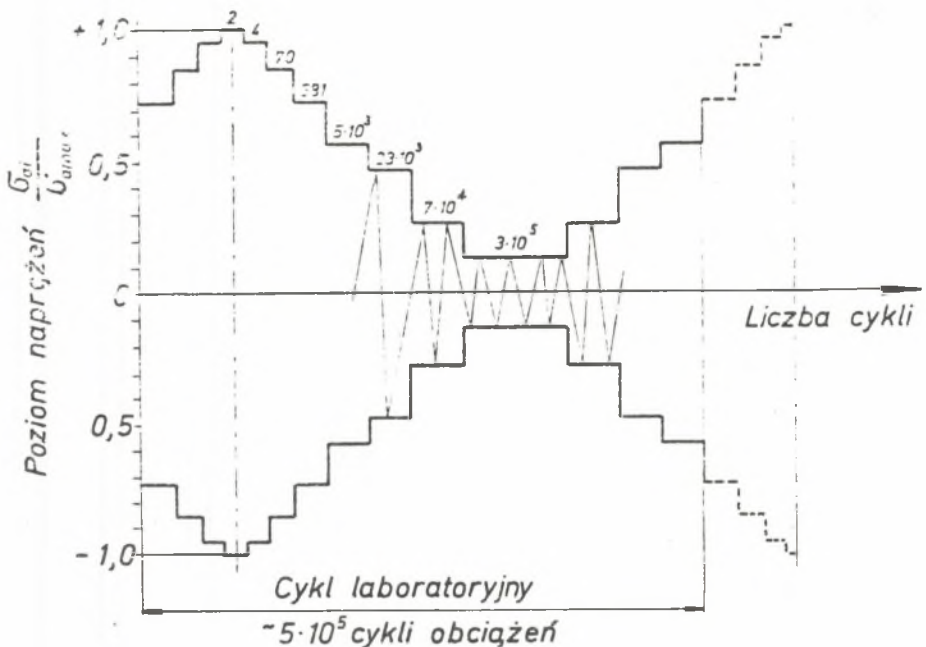
$$\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} = 0,1 \text{ odpowiadał liczbie cykli wynoszącej } 10^6 \text{ (rys. 2).}$$



Rys. 2. Sposób aproksymacji zmodyfikowanego histogramu wypadkowego przy pomocy programu schodkowego

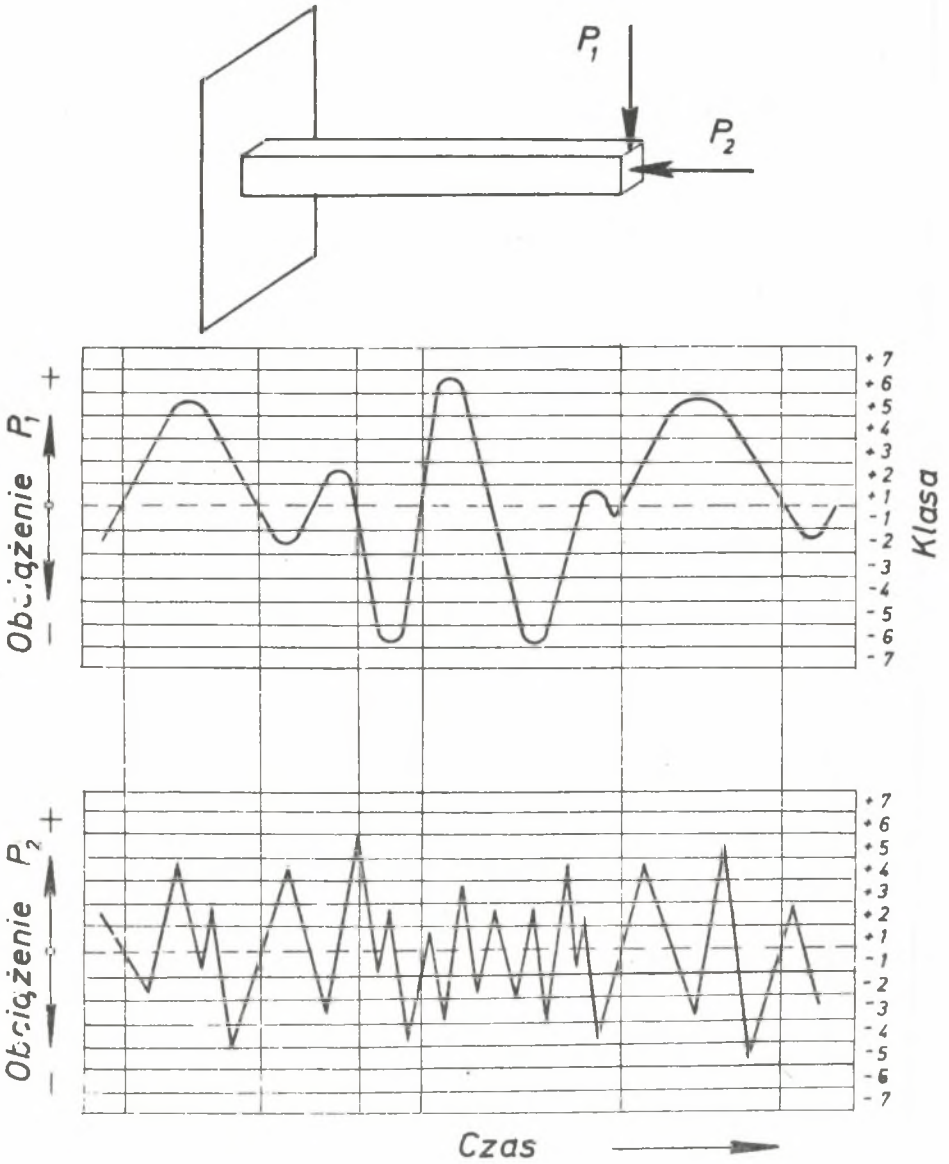
Program schodkowy, będący aproksymacją krzywej histogramu, składa się najczęściej z 6 do 8 schodków (rys. 3). Całkowity program winien być tak orracowany, aby próba wymagała co najmniej 10-krotnego powtórzenia pełnego cyklu laboratoryjnego. Stąd też ten ostatni zawiera zwykle  $5 \times 10^5$  cykli obciążeń [2,3]. Próbę rozpoczyna się przy średniej wartości poziomu na przecięciu  $\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} = 0,1$ , stosując taką liczbę cykli, jaka jest przewidziana

dla danego schodka programu. Następnie przechodzi się do kolejnego schodka o większym poziomie naprężeń itd., aż do osiągnięcia wartości  $\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} = 1,0$ . Dalsza część programu składa się z kolejno po sobie następujących schodków, początkowo o amplitudach malejących, a następnie o wzrastających. Próba kończy się po wystąpieniu uszkodzenia badanego elementu, lub po wykonaniu określonej programem liczby cykli.



Rys. 3. Pełny cykl laboratoryjny programu schodkowego dla obciążenia pojedynczego

Czas programowania badań zmęczeniowych można znacznie skrócić stosując ich intensyfikację, polegającą na zwiększeniu w tym samym stopniu poziomów naprężeń dla poszczególnych schodków programu. Przyjmując dla przykładu, że współczynnik intensyfikacji amplitudy naprężeń wynosi 1,4, co oznacza, że amplitudy naprężeń zostały podczas próby zintensyfikowane o 40%, czas potrzebny na realizację badania ulegnie 10-krotnemu skróceniu [4].

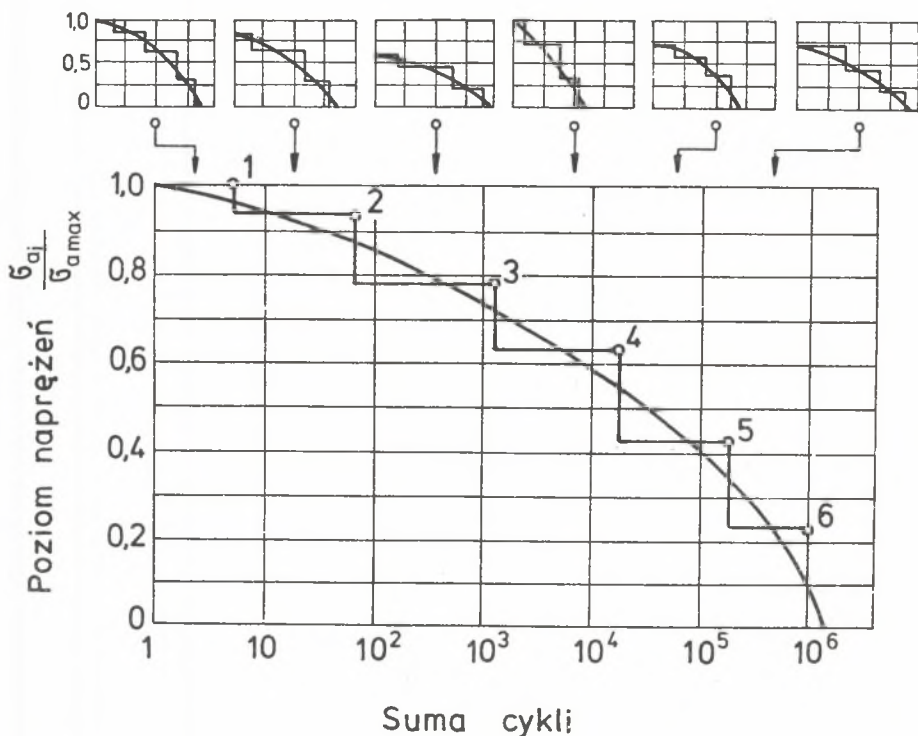


Rys. 4. Sposób zliczania wartości szczytów obciążeń  $P_1$  i  $P_2$  z zachowaniem zależności w czasie

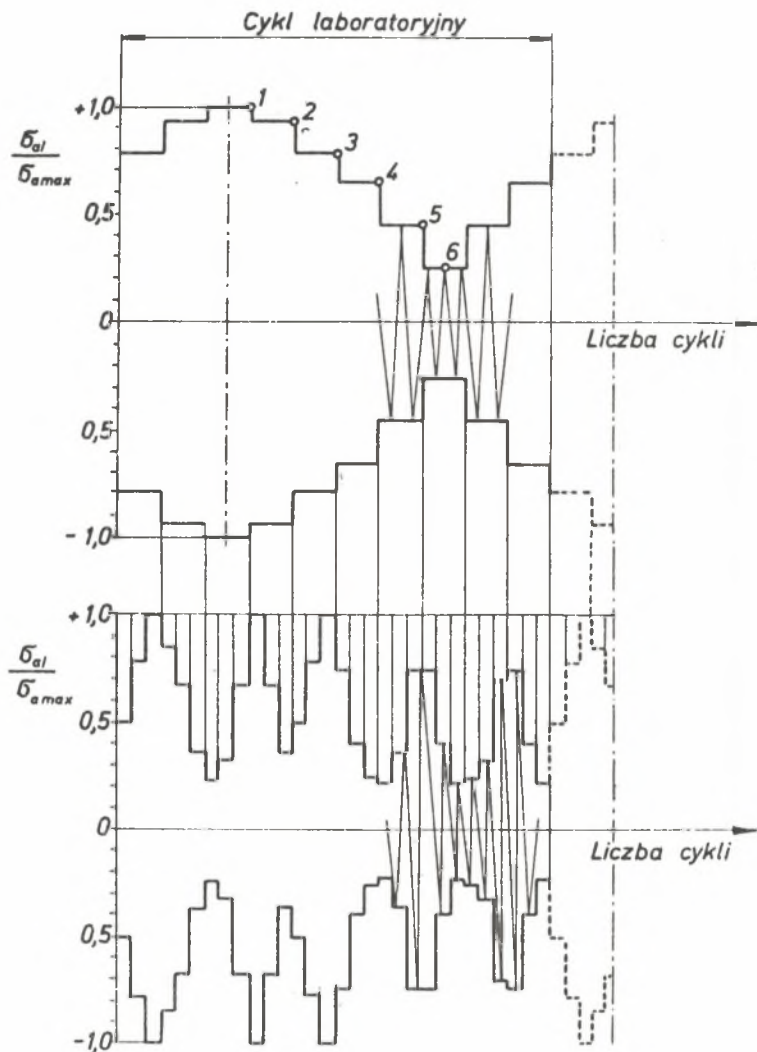
### 3. Program schodkowy dla obciążenia zwielokrotnionego

W wielu spotykanych w praktyce przypadkach, elementy urządzeń są poddane jednoczesnemu działaniu kilku obciążeń o różnym charakterze. Przykładem może być rama samochodu, której podłużnice są zginane w dwóch płaszczyznach (poziomej i pionowej), a ponadto są skręcane. Program badań winien się wówczas składać z tylu oddzielnych programów schodkowych, ile jest sił działających w warunkach eksploatacyjnych na rozpatrywany element. Aby uzyskać wystarczającą dla celów praktycznych dokładność wyników, winna być zachowana zależność w czasie między poszczególnymi programami. Oczywiście, zależność ta musi być już zachowana podczas zapisu naprężeń eksploatacyjnych na taśmie magnetycznej, co uzyskuje się stosując wielokanałowy rejestrator magnetyczny.

Widmo naprężeń zarejestrowane na jednym z kanałów przyjmuje się jako główne i na jego podstawie opracowuje się program schodkowy. Następnie, w



Rys. 4. Histogramy naprężeń dla obciążenia  $P_2$  w funkcji poszczególnych schodków programu dla obciążenia głównego  $P_1$

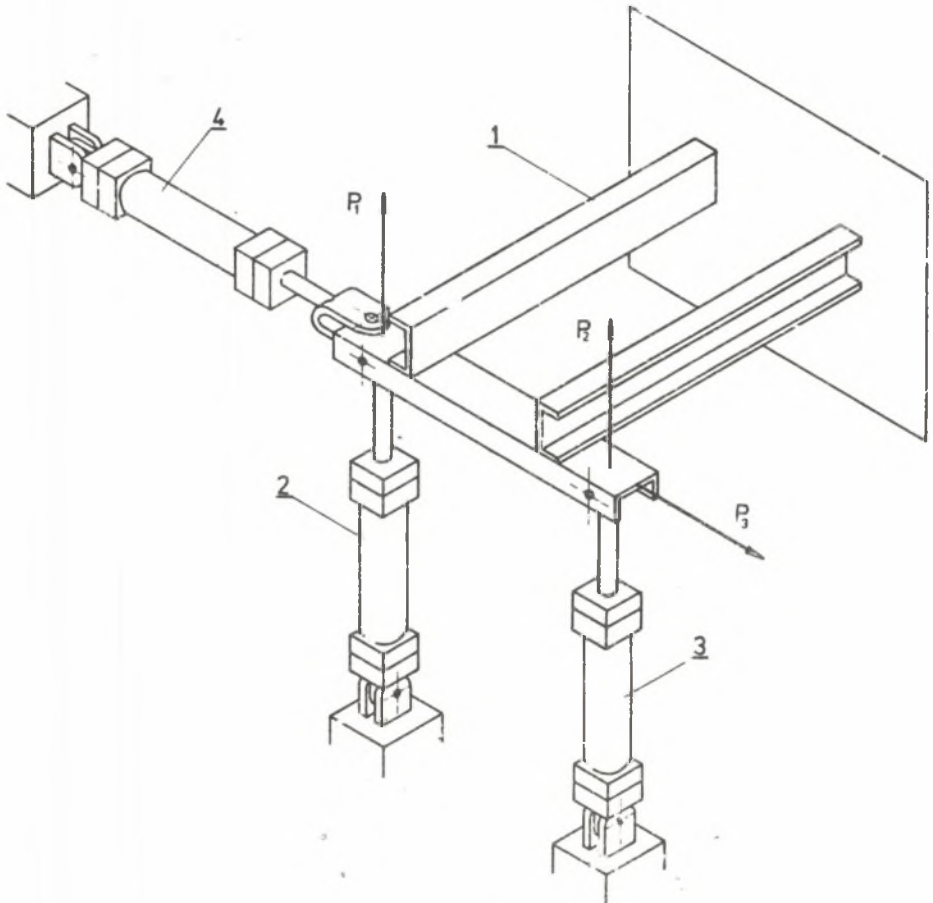


Rys. 6. Programy schodkowe dla obciążeń  $P_1$  i  $P_2$  z zachowaniem wzajemnej zależności w czasie

funkcji poszczególnych schodków programu głównego zlicza się np. szczyty naprężeń występujące w różnych klasach dla widma zarejestrowanego na innym kanale. Sposób zliczania szczytów naprężeń dla obciążenia  $P_2$  w funkcji różnych poziomów naprężeń dla obciążenia głównego  $P_1$  pokazany jest na rys. 4. W wyniku zliczania uzyskuje się tyle oddzielnych histogramów,

aprosymowanych następnie liniami schodkowymi, ile schodków zawierał program główny (rys. 5).

Laboratoryjny program wykonawczy symulujący złożone obciążenia eksploatacyjne opracowuje się w taki sposób, aby każdy z schodków programu dla obciążenia  $P_2$  wykonywany był równocześnie z odpowiednim schodkiem programu dla obciążenia głównego  $P_1$ . W podobny sposób przygotowuje się program symulujący obciążenie  $P_3$ , zarejestrowane na innym kanale rejestratora magnetycznego (rys. 6). Pomiar obciążeń eksploatacyjnych wykonuje się tak, aby  $P_1$ ,  $P_2$  i  $P_3$  były wzajemnie do siebie prostopadłe. W podobny sposób rozmieszcza się pulsatory stanowiska badawczego, symulujące obciążenia eksploatacyjne.



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia pulsatorów podczas badania ramy



Na rys. 7 przedstawiono sposób badania ramy (1), która w warunkach eksploatacyjnych jest poddana działaniu obciążeń pionowych i poziomych. Jej podłużnice są zginane w dwóch płaszczyznach, a ponadto są jeszcze skręcane. Zginanie w płaszczyźnie pionowej wystąpi wówczas, gdy  $P_1 = P_2$ , a więc gdy obciążenie ramy jest symetryczne. W przypadku jednak, gdy obciążenie jest niesymetryczne, podłużnice ramy są zarówno zginane jak i skręcane. Obciążenia eksploatacyjne  $P_1$  i  $P_2$  działające na poprzeczkę przedniej końcówki ramy są symulowane podczas badań przez siły wytwarzane przez pulsatory (2) i (3), sterowane przy pomocy dwóch niezależnych programów schodkowych. Obydwa programy są w zasadzie identyczne, jednakże dla wywołania złożonych naprężeń zginająco-skręcających badanej ramy, muszą być względem siebie przesunięte w fazie. Stosowane w praktyce układy sterujące umożliwiają przesuwanie faz w sposób ciągły w zakresie od 0 do  $20^\circ$ . Obciążenie poziome realizuje się przy pomocy pulsatora (4) sterowanego przy pomocy programu schodkowego, związanego w czasie z programem pulsatora (2).

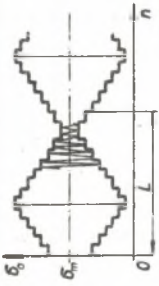
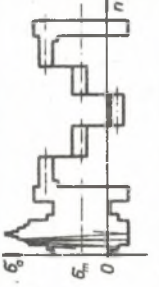
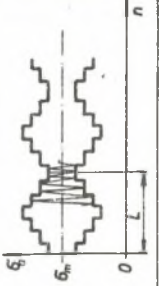
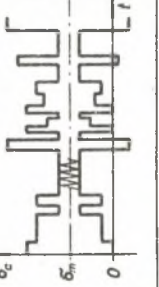
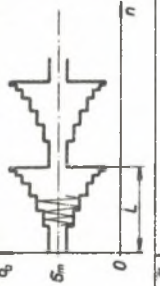
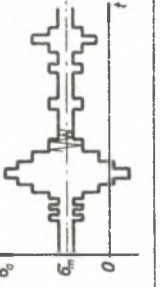
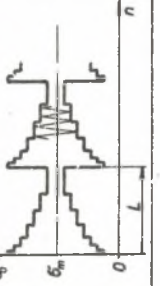
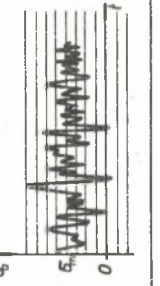
#### 4. Stosowane programy badań

Jak wynika z dotychczasowej praktyki, najszersze rozpowszechnienie znalazł klasyczny program 8-mio schodkowy. Jednakże dążność do uzyskania coraz lepszego przybliżenia do losowego przebiegu obciążeń eksploatacyjnych jest przyczyną wprowadzenia coraz to nowych programów blokowych, o uporządkowanej lub losowej kolejności poszczególnych grup obciążeń (rys. 8). Wszystkie rozpatrywane programy charakteryzują się stałą wartością średniego naprężenia  $\sigma_m$ , co ma bezpośredni związek z względną prostotą stosowanych urządzeń sterujących.

Programy o uporządkowanej kolejności poszczególnych grup obciążeń (poz. 1 do 4 na rys. 8) mogą być realizowane za pomocą najprostszych urządzeń sterujących, gwarantujących stałą wartość amplitudy obciążeń w zakresie każdej z grup tworzących program. Programy o losowej kolejności grup obciążeń (poz. 6 i 7 na rys. 8) oraz program o losowej kolejności cykli obciążeń (poz. 8 na rys. 8) wymagają do ich realizacji urządzeń sterujących z programem zapisanym na taśmie magnetycznej lub perforowanej.

Wyniki uzyskiwane w przypadku badań o różnych programach nie są porównywalne, nawet gdy zostały opracowane na podstawie tego samego rozkładu częstości obciążeń. Należy jednakże podkreślić, że na porównywalność uzyskiwanych wyników mają również wpływ inne czynniki, takie jak np. metoda klasyfikacji obciążeń zastosowana dla uzyskania wykresu częstości obciążenia średniego, wartość obciążeń szczytowych itp.

Badania programowane pozwalają na określenie ze znacznym prawdopodobieństwem trwałości dla przebiegów mających charakter normalnego rozkładu częstości obciążeń. Natomiast wyniki uzyskiwane dla przebiegów o normalnym rozkładzie logarytmicznym, prowadzą do przeceniania trwałości, w porównaniu z trwałością występującą w rzeczywistej eksploatacji.

Lp.	Rodzaj programu	Charakterystyka	Lp.	Rodzaj programu	Charakterystyka
1		Konwencjonalny, 8-mio schodkowy.	5		GAG (ground-air-ground).
2		Zmniejszona liczba schodków.	6		Losowy układ bloków.
3		Amplitudy zwiększają się kolejno.	7		Układ bloków wg. falcucha MARKOWA.
4		Amplitudy zmniejszają się kolejno.	8		Losowa kolejność cykli obciążeń (program symetryczny wzgl. 6').

L - pojedynczy cykl laboratoryjny  
n - liczba cykli

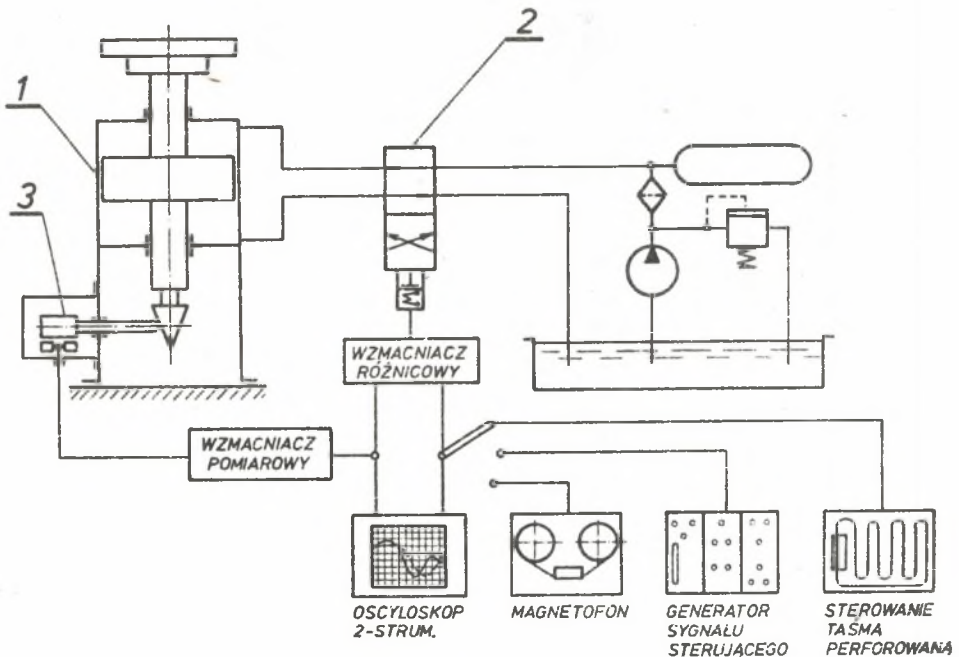
Rys. 8. Różne rodzaje programów

### 5. Serwohydrauliczne urządzenia badawcze

Zakres i jakość wykonywanych badań programowanych zależą w znacznym stopniu od możliwości zastosowanych urządzeń, do których należą przede wszystkim różnego rodzaju pulsatory, głównie serwohydrauliczne. W ostatnich latach można było zaobserwować szybki rozwój pulsatorów serwohydraulicznych, które przy współpracy z elektronicznymi urządzeniami pomiarowymi i regulacyjnymi, pozwalają na dokładne realizowanie złożonych przebiegów obciążeń.

Pulsatory serwohydrauliczne znajdują zastosowanie przede wszystkim w zakresie niskich częstotliwości zmian obciążeń (od 0 do 100 Hz) dużych skoków roboczych (od 250 mm) i znacznych obciążeń.

Schemat pulsatora wraz z układem zasilającym i regulacyjnym jest przedstawiony na rys. 9. Do sterowania cylindra dwustronnego działania (1) służy zawór serwohydrauliczny (przetwornik elektrohydrauliczny). Zawór ten (2) umożliwia zasilanie cylindra olejem, doprowadzanym pod ciśnieniem roboczym rzędu 200 do 300  $\text{kg/cm}^2$ .



Rys. 9. Schemat układu hydraulicznego

1 - cylinder roboczy, 2 - zawór sterujący (przetwornik elektrohydrauliczny), 3 - przetwornik przesunięcia

Sygnal elektryczny pochodzący z przetwornika przesunięcia tłoka roboczego (3) jest doprowadzany do wzmacniacza pomiarowego, skąd zostaje przekazany do wzmacniacza różnicowego. W wzmacniaczu różnicowym ma miejsce porównywanie sygnału zmierzonego z sygnałem zadany, pochodzących z jednego z urządzeń programujących. Sygnal wyjściowy z wzmacniacza różnicowego jest sygnałem sterującym zawór serwohydrauliczny. Zawór ten jest elementem proporcjonalnym, którego wyjściem jest natężenie przepływu oleju zasilającego cylinder roboczy.

Poszczególne ogniwa rozpatrywanego urządzenia badawczego, a mianowicie: cylinder, przetwornik przesunięcia tłoka, wzmacniacz pomiarowy, wzmacniacz różnicowy i zawór serwohydrauliczny, tworzą zamknięty układ regulacyjny.

Sygnal sterujący, w zależności od przyjętego programu badań, jest doprowadzany do wzmacniacza różnicowego w postaci elektrycznego sygnału ciągłego o odpowiednio zmieniającej się amplitudzie. Sygnal ten pochodzi z urządzenia programującego o taśmie magnetycznej lub perforowanej, z generatora funkcyjnego, komputera itp.

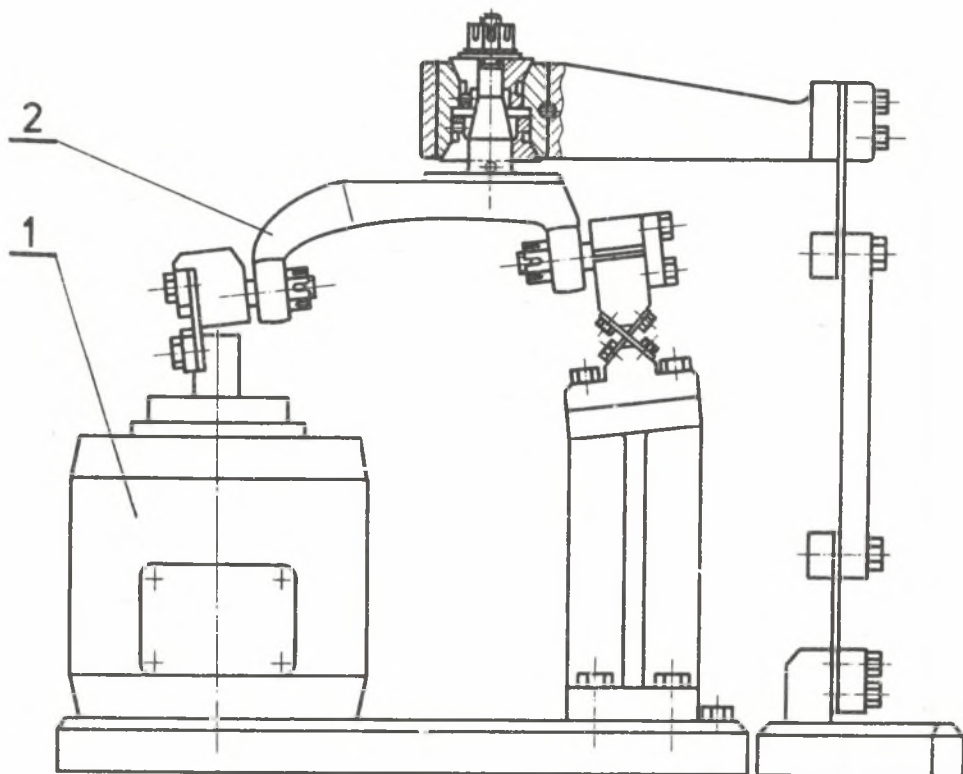
## 6. Przykład badań programowanych

Zwrotnica koła przedniego samochodu, jest jednym z najbardziej odpowiedzialnych elementów pojazdu, mającym decydujący wpływ na bezpieczeństwo jazdy. Czop zwrotnicy jest narażony podczas eksploatacji na działanie naprężeń zginających, wywołanych obciążeniami zmieniającymi się losowo.

Badania programowane czopa zwrotnicy przeprowadzić można stosując urządzenie specjalne, przedstawione na rys. 10. Obciążenia zwrotnicy są wywoływane działaniem pulsatora serwohydraulicznego (1). Konstrukcja stanowiska umożliwia rozkład obciążeń w elemencie badanym, zbliżony do rozkładu obciążeń eksploatacyjnych.

Dla wyznaczenia trwałości zmęczeniowej czopa zwrotnicy, jak również dla porównania wyników uzyskiwanych w przypadku badań różnymi metodami, przeprowadzono [7] badania, stosując następujące programy:

1. Konwencjonalny program 8-mio schodkowy,
2. Program schodkowy zmodyfikowany.
3. Program składający się z oddzielnych grup obciążeń zmiennych o stałej w danej grupie amplitudzie, usytuowanych symetrycznie w stosunku do  $\bar{\sigma}_m$ , o losowym rozmieszczeniu poszczególnych grup w czasie (poz. 6 na rys.8).
4. Program o budowie podobnej do poprzedniego, lecz o rozmieszczeniu poszczególnych grup w czasie łańcucha według Markowa (poz. 7 na rys.8).



Rys. 10. Stanowisko do badań zmęczeniowych zwrotnic:  
1 - pulsator, 2 - badana zwrotnica

Budowa programu 8-mio schodkowego oparta była na podziale rozkładu normalnego naprężeń eksploatacyjnych, przedstawionego w tabelicy 1. Przyjęto, że pojedynczy cykl laboratoryjny składa się z  $4 \times 10^3$  cykli obciążeń, co gwarantuje wielokrotne jego powtórzenie, aż do spowodowania uszkodzenia badanego elementu. Próbę rozpoczyna się zawsze przy średniej wartości amplitudy naprężeń, odpowiadającej piątemu schodkowi programu. Ma to na celu zmniejszenie efektu umocnienia materiału. Stosując pierwszy program zbadano 25 zwrotnic, przedstawiając uzyskane wyniki w postaci wykresu zmęczeniowego (rys. 11).

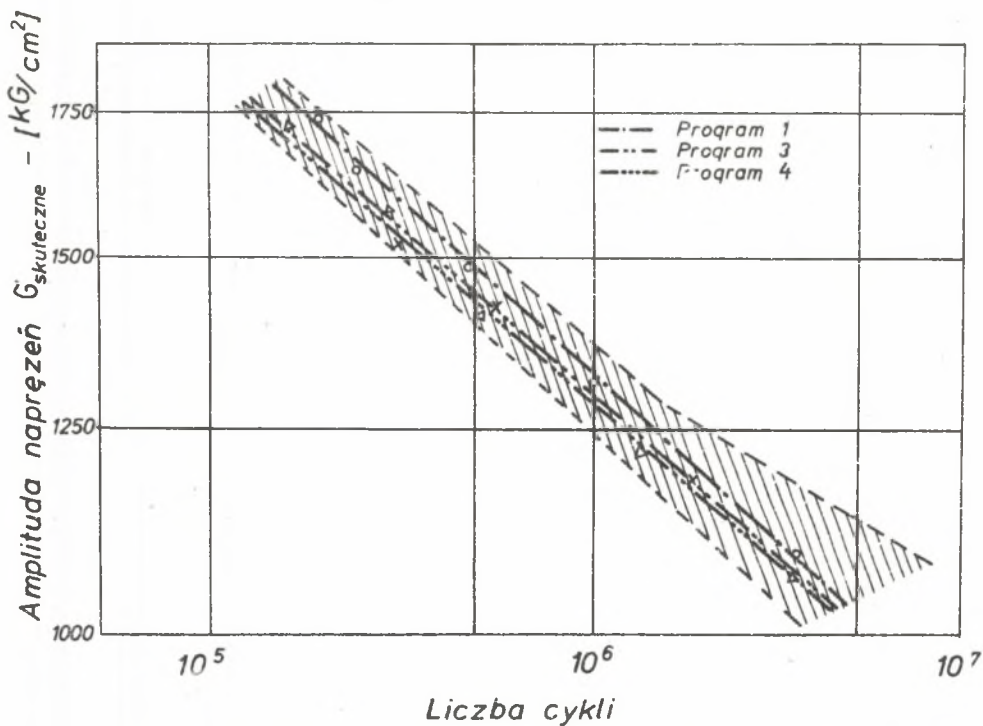
Według programu zmodyfikowanego zbadano dalszych 25 zwrotnic. Zastosowana modyfikacja polegała na realizacji jedynie pięciu schodków (od pierwszego do piątego), z klasycznego programu 8-mio schodkowego. Pomijając trzy ostatnie schodki, stanowiące część programu zawierającą znaczną liczbę cykli o małych amplitudach (tabelica 1), uzyskano znaczne przyspieszenie wykonywanych badań.

Tablica 1

Podział rozkładu normalnego naprężeń o liczbie cykli  
 $N = 4 \cdot 10^3$  na 8 schodków

Stopień	Poziom $\sigma_{ni}$ $\sigma_{amax}$	Liczba cykli dla jednego schodka	Suma cykli
1	1,000	1	1
2	0,937	4	5
3	0,812	40	45
4	0,687	92	137
5	0,562	360	497
6	0,437	732	1229
7	0,270	1740	2969
8	0,120	1031	4000

gdzie:  $\sigma_{ai}$  - amplituda bieżąca  
 $\sigma_{amax}$  - amplituda maksymalna



Rys. 11. Przykład wykresu przedstawiającego wyniki badań

Badania realizowane według pozostałych dwóch programów, miały głównie na celu określenie wpływu losowego rozmieszczenia poszczególnych grup obciążeń na trwałość zmęczeniową. Wszystkie badania, niezależnie od stosowanego programu, były realizowane przy nieziennej częstotliwości pracy pulsatora, wynoszącej 15 Hz. Zwrotnice były wykonane ze stali SAE5130.

Na rys. 11 przedstawiono wyniki badań wykonanych według pierwszego, trzeciego i czwartego programu. Na ich podstawie można zaobserwować, iż rodzaj przyjętego programu miał jedynie nieznaczny wpływ na uzyskane wyniki badań. Liniami kreskowymi na wykresie zaznaczono granice obszaru odpowiadającego 95% prawdopodobieństwu uszkodzenia czopa, odniesionemu do wyników badań uzyskanych w przypadku pierwszego programu. Z wykresu wynika, że wytrzymałość zmęczeniowa badanego elementu określona przy zastosowaniu trzeciego i czwartego programu leży również wewnątrz przyjętego obszaru prawdopodobieństwa. Wewnątrz tego obszaru mieszczą się też wyniki uzyskane dla drugiego programu [7], co jednakże nie zostało uwidocznione na wykresie.

Liczba cykli  $N_2$  przy jakiej element ulegnie uszkodzeniu w warunkach eksploatacyjnych wyniesie

$$N_2 = N_1 \left( \frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a2}} \right)^k,$$

gdzie:

$N_1$  - liczba cykli, przy której element ulega zniszczeniu w badaniach programowanych,

$k$  - wykładnik potęgowy.

Dla elementów maszyn wykonanych ze stali  $k = 6,5 - 7,0$ , średnio  $k = 6,8$  [4].

## 7. Wnioski

Bardzo pracochłonne i wymagające długiego czasu badania eksploatacyjne można zastąpić laboratoryjnymi badaniami programowanymi. Uzyskane wyniki są wystarczająco dokładne, ponieważ charakter procesu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych nie wymaga pełnego odtwarzania warunków eksploatacyjnych podczas badań. Częstotliwość, z jaką się realizuje badania, nie ma większego znaczenia, gdyż wytrzymałość zmęczeniowa metali, w zakresie częstotliwości od 5 do 200 Hz, zmienia się jedynie nieznacznie.

Badania programowane umożliwiają odtwarzanie prawidłowej lokalizacji pęknięcia. Ponadto, pozwalają one na ilościowe porównywanie trwałości zmęczeniowej różnych rozwiązań konstrukcyjnych i różnych materiałów. Są więc szczególnie przydatne dla optymalizacji konstrukcji w stadium rozwoju.

## LITERATURA

- [1] T. Hass - The Engineers Digest, 3, 1962, 79.
- [2] E. Gassner - Konstruktion, 3, 1954, 97.
- [3] G. Bollani - ATA (ASSOCIAZIONE TECNICA DELL' AUTOMOBILE), 11, 1969, 561.
- [4] J. Przybylski - Przegląd Mechaniczny, 4, 1973, 134.
- [5] G. Jacoby - Rheinstahl Technik, 1, 1972, 20.
- [6] G. Jacoby - Zeitschrift für Flugwissenschaften, 18, 1970, 253.
- [7] J.D. Tedford, B. Crossland - Proceedings The Institution of Mechanical Engineers, 24, 187, 1973, 295.

МЕТОДЫ СИМУЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК  
В УСТАЛОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

## Р е з ю м е

Продолжительные и дорогостоящие эксплуатационные усталостные исследования можно заменить стендовыми лабораторными исследованиями проведенными по ступенчатой программе. В статье изложен способ составления ступенчатой программы единичного или сложного случая нагрузки.

THE METHODS OF SIMULATING THE FIELD LOADS  
IN THE FATIGUE INVESTIGATIONS

## S u m m a r y

Expensive and delated field fatigue test can be subsituted by laberatory test based on the step programm methods. In this article there is presented the method for preparing the step programm for the case of single or multiple loading modes of elements.