

Krystian KALINOWSKI, Adam HEYDUK, Roman KAULA, Joachim PIELOT  
Politechnika Śląska, Gliwice

## WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ CYFROWEGO UKŁADU STEROWANIA MASZYNY ZMĘCZENIOWEJ UFP-400

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań działania cyfrowego układu sterowania maszyny zmęczeniowej UFP-400 wykonane w laboratorium Katedry Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Opolskiej. Podstawowe algorytmy układu sterowania to: algorytm pozycjonowania, badań statycznych, badań zmęczeniowych, a także reakcji układu na zerwanie próbki materiału.

## SOME EXPERIMENTAL RESULTS FOR MATERIALS-TESTING MACHINE UFP-400 DIGITAL CONTROL SYSTEM OPERATION

**Summary.** This paper presents some preliminary results of the new digital control system operation, recorded at the laboratory stand at the Technical University of Opole. Four main components of the control system have been tested: closed-loop feedback controller in three different modes of control (position control, static testing with the ramp signal, low-cycle fatigue testing), specimen break detection algorithm, data transmission protocol and database recording software, data conditioning and control signal amplification subsystem.

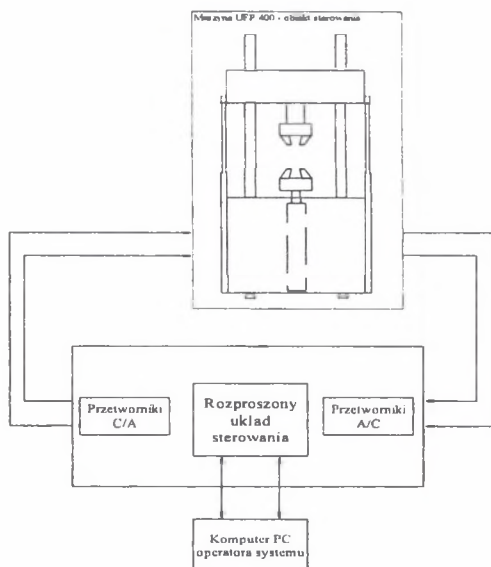
### 1. Wstęp

Badania wytrzymałościowe prowadzone są na stanowiskach do badań zmęczeniowych z użyciem specjalnie do tego celu zaprojektowanych urządzeń, które poddają próbki materiałów różnym obciążeniom. Wobec tego stanowisko do badań zmęczeniowych składa się z urządzenia, które bezpośrednio mechanicznie oddziałuje na próbkę, oraz aparatury służącej do sterowania tym urządzeniem i generowaniem odpowiednich przebiegów zadanych. Program nadrzędny układu sterowania maszyny zmęczeniowej musi zapewnić także rejestrację wybranych wielkości pomiarowych, a także parametrów badania statycznego

i zmęczeniowego. W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań zaprojektowanego i wykonanego układu sterowania maszyn zmęczeniowych. Badania zostały wykonane z wykorzystaniem maszyny UFP-400.

## 2. Układ sterowania do badań zmęczeniowych UFP-400

Układ sterowania maszyny zmęczeniowej (rys.1) ma za zadanie wymuszenie przebiegu czasowego naprężeń zgodnego z przebiegiem zadany przez użytkownika. Odbywa się to przez wygenerowanie odpowiedniego sygnału napięciowego przyłożonego na wejście serwowaloru. Sygnał ten generowany jest przez regulator cyfrowy pracujący w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, przetwarzany na postać analogową przez precyzyjny przetwornik C/A oraz wzmacniany do odpowiedniego poziomu, wynikającego z dopuszczalnego zakresu napięć wejściowych zastosowanego serwowaloru. W rozpatrywanym układzie sterowania zastosowano dyskretną postać klasycznego ciągłego algorytmu regulacji PID.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy układu regulacji  
Fig. 1. Simplified block diagram of the control system

W maszynie zainstalowane są czujniki: przemieszczenia i siły. Pomiar z czujnika przemieszczenia wykorzystywany jest do zamontowania badanej próbki (ustawienia

położenia tłoka), natomiast pomiar z czujnika siły jest sygnałem sterującym dla układu regulacji.

## 2.1. Uśrednianie sygnałów pomiarowych

Ponieważ układ mechaniczny realizujący obciążenie próbki oraz sieć energetyczna wytwarzają zakłócenia analogowych sygnałów pomiarowych, konieczne było zastosowanie filtru tych sygnałów. W przedstawianym układzie zastosowano wykładniczy filtr cyfrowy. Wykładniczy system uśredniający przedstawia się za pomocą wyrażenia [1]:

$$y(n) = \alpha \cdot y_p(n) + (1 - \alpha) \cdot y(n-1) \quad (1)$$

gdzie:

- $y(n)$  – bieżąca wartość filtru uśredniającego,
- $y(n-1)$  – poprzednia wartość filtru uśredniającego,
- $y_p(n)$  – bieżąca wartość danych pomiarowych,
- $\alpha$  – współczynnik wagowy ( $0 < \alpha < 1$ ).

W celu skrócenia przebiegu obliczeń zastosowano tu jedynie arytmetykę całkowitoliczbową, wykorzystującą wzór:

$$y(n) = \frac{10 \cdot \alpha \cdot y_p(n) + 10 \cdot (1 - \alpha) \cdot y(n-1)}{10} \quad (2)$$

W zależności od wartości współczynnika  $\alpha$  można zmieniać stopień szumów pomiarowych w sygnale użytecznym. Im mniejsze  $\alpha$ , tym większa jest osiągana redukcja szumów (kosztem wolniejszej reakcji na zmiany w sygnale wejściowym).

## 3. Regulator cyfrowy PID

Dyskretne wersje klasycznych ciągłych algorytmów regulacji P, PI oraz PID są standardowymi algorytmami regulacji cyfrowej [3]. Zapisując ciągły algorytm regulacji PID w postaci:

$$x(t) = k_r [e(t) + \frac{1}{T_z} \int_0^t e(t) dt + T_w \frac{de(t)}{dt}] \quad (3)$$

można go aproksymować wyrażeniem, w którym całkowanie zastąpiono sumowaniem, a różniczkowanie – różnicą pierwszego rzędu. Stąd dyskretny przyrostowy algorytm PID ma postać:

$$x(i) - x(i-1) = k, \left\{ [e(i) - e(i-1)] + \frac{T_p}{T_i} e(i) + \frac{T_w}{T_p} [e(i) - 2e(i-1) + e(i-2)] \right\} \quad (4)$$

Sygnal uchybu  $e(i)$  w układzie regulacji jest różnicą między wartością zadaną  $y_{zad}(i)$  a wartością  $y(i)$  zmiennej regulowanej:

$$e(i) = y_{zad}(i) - y(i) \quad (5)$$

Można algorytm regulatora PID (4) przekształcić tak, by otrzymać postać uogólnioną:

$$x(i) - x(i-1) = K_p [e(i) - e(i-1)] + K_r e(i) + K_D [(e(i) - 2e(i-1) + e(i-2))] \quad (6)$$

gdzie:

$K_p, K_I, K_D$  – odpowiednio: parametry członu proporcjonalnego, całkującego, różniczkującego.

W celu zwiększenia bezpieczeństwa pracy układu zastosowano odpowiednie ograniczenia nałożone zarówno na sygnał całkowity (sumaryczny), jak i na jego poszczególne składniki (sygnały wyjściowe z poszczególnych członów – proporcjonalnego, całkującego i różniczkującego). Algorytm regulatora zrealizowany jest również w arytmetyce całkowitoliczbowej, umożliwiającą znaczne przyspieszenie przebiegu obliczeń. Uzyskano to przez odpowiednie przeskalowanie sygnałów wejściowych i wyjściowych regulatora.

#### 4. Wstępne wyniki badań

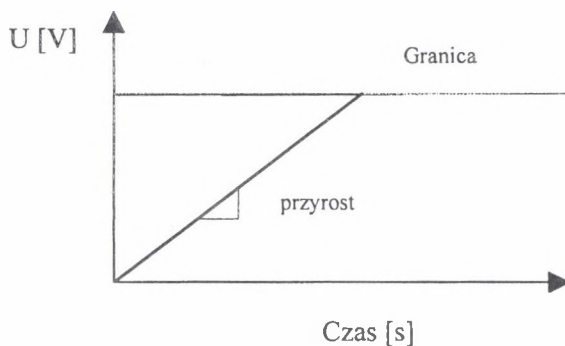
Badania próbek materiału poddawane działaniu sił zmieniających się co do wielkości i kierunku działania nazywamy zmęczeniowymi. Podczas badań zmęczeniowych stosuje się różne przebiegi zadawanego obciążenia. Najczęściej jest to przebieg sinusoidalny o zadanej amplitudzie i częstotliwości. Badania próbek poddawane działaniu sił w jednym kierunku nazywamy statycznymi. Do testów statycznych wykorzystywany jest generator ramp, który zdefiniowany jest przez trzy parametry: wartość maksymalną, czas osiągnięcia wartości maksymalnej oraz kierunek badań (ściskanie znak -, rozciąganie znak +).

Badania pracy układu sterowania przeprowadzono w laboratorium Katedry Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Opolskiej. Na obecnym etapie zaawansowania

prac mierzone wartości siły podawane są w woltach (proporcjonalne do wartości siły). Zmiana na jednostki siły (kN) nastąpi po przeprowadzeniu skalowania.

#### 4.1. Badania statyczne

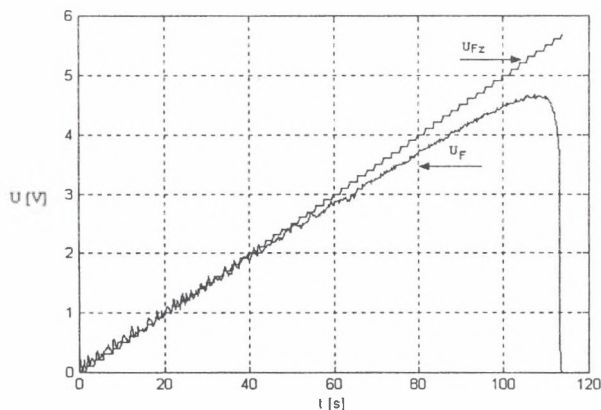
Podanie wartości maksymalnej obciążenia oraz zadanego czasu narastania pozwala obliczyć przyrost wartości siły w badaniu typu „rampa” (rys.2).



Rys. 2. Parametry opisujące kształt rampy

Fig. 2. The ramp signal description parameters

Na rys. 3 przedstawiono przebieg badania statycznego zakończony zerwaniem próbki materiału.



Rys. 3. Przebieg ilustrujący zerwanie próbki materiału w trakcie badania statycznego

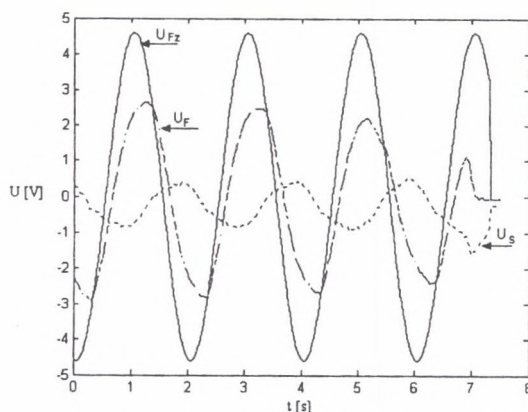
Fig. 3. Specimen break during ramp signal testing

Test przeprowadzono dla  $U_{\max}=6$  V oraz  $t_{\max}=120$  s. Przyrost napięcia (proporcjonalny do przyrostu zadanej siły) w jednostce czasu wynosi 0,05 V/s. Zerwanie nastąpiło dla  $U_{Fz}=5,6$  V. Na wykresie można zauważyć przedziały odkształceń sprężystych oraz plastycznych

materiału aż do zerwania próbki. Reakcja układu sterowania na zerwanie próbki w trakcie badań statycznych jest identyczna z reakcją układu opisaną w p. 4.2 dotyczącym badań zmęczeniowych.

#### 4.2. Badania zmęczeniowe

Na rys. 4 przedstawiono przebieg badania zmęczeniowego zakończonego zerwaniem próbki materiału. Test przeprowadzono dla wymuszenia o przebiegu sinusoidalnym: amplitudzie  $U_{Fz}=4,6$  V oraz częstotliwości  $f=0,5$  Hz.



Rys. 4. Przebieg ilustrujący zerwanie próbki materiału w trakcie badania zmęczeniowego  
Fig. 4. Specimen break during fatigue test

#### *Automatyczne wykrycie zerwania próbki*

Opisywany układ sterowania wyposażony jest w algorytm automatycznego wykrywania zerwania próbki. W algorytmie tym założono, że w chwili zerwania wartość zmierzona z czujnika siły stale będzie bliska bądź równa zero. Funkcja realizująca wykrycie zerwania próbki zlicza kolejne wystąpienia pomiarów zbliżonych do zera. Jeżeli nastąpi odczyt  $N$  takich kolejnych pomiarów (dla których jednocześnie zadana wartość siły jest różna od zera), rozpoznane zostanie zerwanie próbki i na serwozawór zostanie podany sygnał ( $U_S=-0.24$  V), który spowoduje jego ustawienie w położeniu zerowym (rys. 4) oraz zatrzymanie siłownika w położeniu, umożliwiającym bezpieczne rozsunięcie szczęk i rozmontowanie próbki. Rejestracja badania zostanie zakończona, a na ekranie monitora pojawi się informacja o zerwaniu próbki.

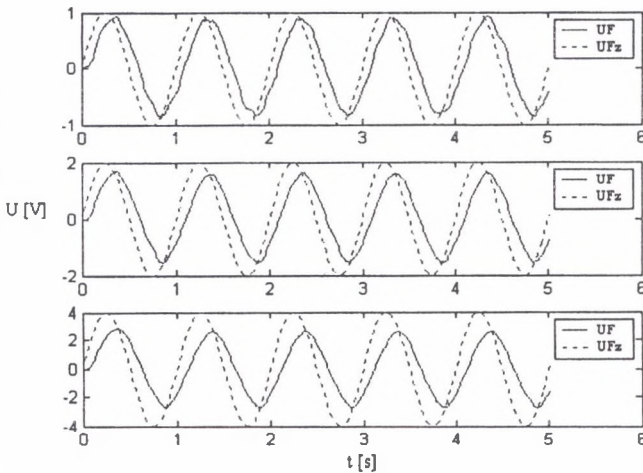


#### 4.3. Ograniczenia sterowania wynikające z właściwości dynamicznych układu mechanicznego

W celu sprawdzenia właściwości dynamicznych maszyny UFP-400 przeprowadzono szereg testów zmęczeniowych. Próbkę poddawano obciążeniu okresowemu o przebiegu sinusoidalnym. Amplitudę przebiegu zadanego zmieniano w zakresie, od 1V do 4 V przy częstotliwości  $f = 1$  Hz. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 5-6.

Na podstawie tych wyników sformułować można następujące wnioski, dotyczące dynamiki układu mechanicznego maszyny UFP-400, decydujące o jakości pracy układu regulacji:

- układ zasilania hydraulicznego maszyny UFP-400 nie posiada akumulatora hydraulicznego, co w dużej mierze ogranicza od góry zakres częstotliwościowy przenoszonych sygnałów okresowych,
- znamionowa wartość częstotliwości przenoszonych sygnałów zmiennych wynosi  $f=5$  Hz. Eksploatacja maszyny pokazała jednak, że rzeczywisty zakres przenoszonych częstotliwości ograniczony jest do 1 Hz,
- dla badań zmęczeniowych o większej amplitudzie należy częstotliwość przebiegu zadanego ograniczyć do wartości  $f_{\max} = 0,5$  Hz (wniosek taki można przedstawić po przeanalizowaniu wyników badań przedstawionych na rys.6 - zwiększanie wzmocnienia członu proporcjonalnego regulatora PID nie prowadzi do poprawy jakości pracy układu).



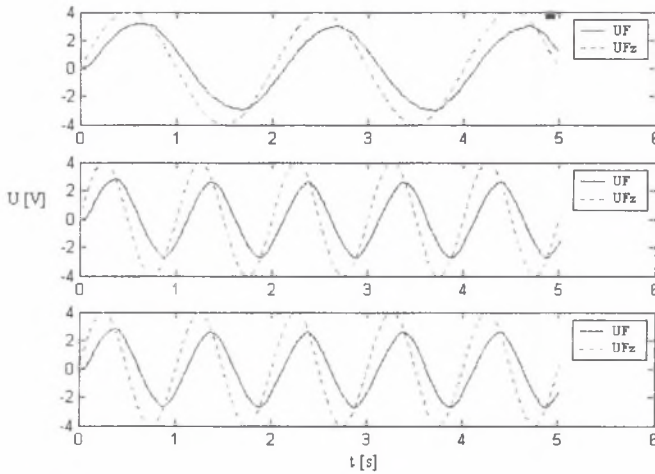
Rys. 5. Przebiegi wartości zadanej i wyjściowej dla badania zmęczeniowego

Fig. 5. Reference and output signal values for fatigue testing

a)  $UF_z=1V$ ,  $f=1Hz$

b)  $UF_z=2V$ ,  $f=1Hz$

c)  $UF_z=4V$ ,  $f=1Hz$



Rys. 6. Przebiegi wartości zadanej i wyjściowej dla badania zmęczeniowego  
 Fig. 6. Reference and output signal values for fatigue testing

- a)  $UFz=4V$ ,  $f=0,5Hz$ ,  $Kp=4$
- b)  $UFz=4V$ ,  $f=1$  Hz,  $Kp=4$
- c)  $UFz=4V$ ,  $f=1$  Hz,  $Kp=2$

## 5. Wnioski

Prezentowany układ dzięki rozbudowanej rejestracji i prezentacji przebiegu czasowego parametrów pracy stanowi istotne rozszerzenie możliwości badawczych maszyny UFP-400. Zastosowane nowoczesne rozwiązania umożliwiają łatwe i bezpieczne prowadzenie zarówno badań statycznych, jak i zmęczeniowych. Wyniki pierwszych badań, przeprowadzonych w laboratorium Katedry Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Opolskiej, w całej pełni potwierdzają słuszność koncepcji technicznej oraz niezawodność opracowanego oprogramowania. Do całkowitej oceny układu niezbędne jest jeszcze odpowiednie wycechowanie aktualnie stosowanego w maszynie UFP-400 czujnika siły. Regulacja wartości siły prowadzona jest w sposób autonomiczny, niezależnie od komputera PC, zajmującego się jedynie rejestracją danych w trakcie pracy. Dalsze prace rozwojowe obejmować będą rozszerzenie liczby mierzonych parametrów o wartość odkształcenia próbki, co umożliwi wyznaczenie wartości parametru energetycznego, a nawet sterowanie przebiegiem czasowym odkształcenia lub parametru energetycznego w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Przewidywane jest zastosowanie procesorów RISC o większej mocy obliczeniowej oraz większej pamięci próbek oraz adaptacja konstrukcji układu do maszyn o lepszych



własnościach dynamicznych, wyposażonych w akumulatory hydrauliczne. Modułowa struktura układu umożliwia łatwą adaptację konfiguracji na potrzeby maszyn wielokanałowych generujących obciążenia losowe w kilku osiach [2].

## LITERATURA

1. Lyons R., 2000: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów. WKŁ, Warszawa.
2. Łagoda T., Macha E., 1998: Wieloosiowe zmęczenie losowe elementów maszyn i konstrukcji. Cz III. SiM z 104, Oficyna Wyd. Politechniki Opolskiej, Opole.
3. Niederliński A., 1985: Systemy komputerowe automatyki przemysłowej. T. 2. Zastosowania. WNT, Warszawa.

*Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego KBN 8 T07C 052 21.*

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ewald Macha

## Abstract

Material testing is very important for the search for better materials, quality control in manufacturing and for assurance about the lifetime of components when subjected to cyclic loading. A good control system is vital for the overall performance of the material testing machine. This paper presents some preliminary results of the new digital control system operation, recorded at the laboratory stand at the Technical University of Opole. Four main components of the control system have been tested:

- closed-loop feedback controller in three different modes of control:
  - position control,
  - static testing with the ramp signal,
  - low-cycle fatigue testing.
- specimen break detection algorithm,
- data transmission protocol and database recording software,
- data conditioning and control signal amplification subsystem.

Digital exponential smoothing filter had to be applied in order to damp spike disturbances connected with the power supply network. Preliminary tests, conducted with several specimens have shown, that all the above components (in all necessary operation modes) operate correctly. The whole control system is reliable (can operate independently of the PC computer) and easy to use.

Dynamical properties of the applied PID controller have proved to be satisfactory. The useful signal bandwidth has been limited (practically to less than 1Hz) only by the very poor dynamical properties of the hydraulic subsystem of the UFP-400 machine. The dynamic performance is good enough to provide accurate high speed load reversal. This is required in low cycle fatigue testing, where a component is to be subjected rapidly to many thousands of stress cycles. Strain history, recorded in the database can be presented (numerically and graphically) in several formats, very convenient for the user and can provide a lot of knowledge on the qualitative parameters of the tested material.

Both the control panel on the PC screen (including a simple digital oscilloscope for on-line transient presentation) and the independent LED system have shown to be very convenient and efficient for the user and can supply a lot of diagnostic information.