

Tadeusz SONDEJ, Ryszard PEŁKA  
Wojskowa Akademia Techniczna  
Instytut Telekomunikacji

## KALIBRACJA DALMIERZA LASEROWEGO Z WYKORZYSTANIEM LOGIKI ROZMYTEJ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę kalibracji wykorzystującą logikę rozmytą. Metoda ta została zaimplementowana do kalibracji błędu długoczasowego, związanego z dryftem temperaturowym w impulsowym dalmierzu laserowym. Zadaniem rozważanego kalibratora jest minimalizacja błędu dryftu przy jednoczesnej minimalizacji liczby procesów kalibracji. Odstępy pomiędzy kalibracjami są wyznaczane adaptacyjnie do wartości błędu dryftu i czasu ostatniej kalibracji. Wartość błędu dryftu wyznaczana jest na podstawie pomiaru znanej odległości. W artykule przedstawiono również ideę klasycznej metody adaptacyjnej oraz dokonano porównania tych metod. Badania eksperymentalne przeprowadzono w dwóch różnych, rzeczywistych warunkach pomiarowych. Przedstawione metody kalibracji mogą być stosowane również w innych rodzajach systemów pomiarowych.

## FUZZY LOGIC CALIBRATION

**Summary.** In this paper we describe a novel calibration method based on fuzzy logic principle. This method has been implemented for calibration of long-term error due to the temperature drift in pulsed laser rangefinder. Estimation of drift error is optimized for minimum number of calibration points. Time intervals between successive calibrations are adjusted adaptively, according to the current value of drift error obtained at the last calibration point. Current value of drift error is calculated by measurement of the constant and known distance. In this paper we also present conventional adaptive calibration method and comparison related to the fuzzy calibrator. Experimental results have been performed for two different environmental conditions. New method of calibration presented in the paper may be also applied to the other measurement systems.

### 1. WSTĘP

We współczesnych przyrządach pomiarowych zapewnienie wymaganej dokładności pomiarów bardzo często wymaga stosowania kalibracji tego przyrządu. Wiele przyrządów posiada wbudowane układy sprzętowe i procedury programowe do przeprowadzania okresowej, automatycznej kalibracji. W najprostszych przypadkach realizowana jest kalibracja w stałych odcinkach czasu. Kalibracja taka może być jednak nieefektywna, zwłaszcza w sytuacjach dużej dynamiki zmian środowiska pomiarowego. Wybór odstępu czasu pomiędzy kolejnymi kalibracjami jest zawsze kompromisem pomiędzy wymaganą dokładnością a liczbą

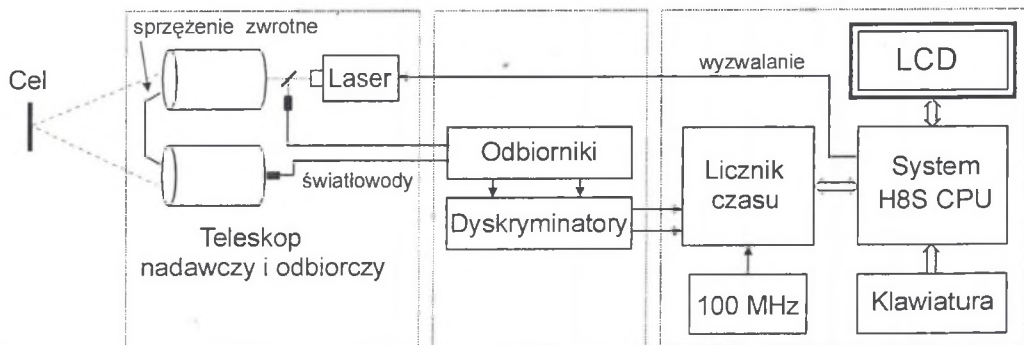
przeprowadzonych kalibracji. Problem kalibracji jest szczególnie istotny w dalmetrii laserowej, w pomiarach do poruszających się obiektów i w różnych warunkach środowiskowych.

W impulsowych dalmierzach laserowych dokładność pomiaru odległości zależy od rozdzielczości i błędów zastosowanego licznika czasu, błędów nadajnika i odbiornika oraz fluktuacji impulsów świetlnych. Obecnie możliwe jest uzyskanie rozdzielczości licznika czasu równej 200 ps (a nawet 10 ps), co odpowiada odległości równej około 30 mm (1,5 mm). Przy założeniu że w dalmierzu zastosowano licznik czasu o dokładności rzędu kilkudziesięciu ps, głównym źródłem błędów w dalmierzu jest układ nadajnika i odbiornika impulsów świetlnych. Błędy te związane są między innymi z dryftem temperaturowym, który w decydujący sposób wpływa na parametry fotodiody lawinowej, stosowanej w odbiornikach optycznych. Wartość tego dryftu może kilkakrotnie pogorszyć dokładność pomiaru odległości. Ponieważ błąd wywołany dryftem temperaturowym (błąd długoczasowy) oddziałuje w długim czasie (rzędu minut) w odniesieniu do czasu procesu pomiarowego (rzędu milisekund), celowe jest przeprowadzanie okresowej kalibracji dalmierza. Kalibracja ta polega na pomiarze znanej odległości, a następnie wprowadzaniu poprawki do pomiaru użytecznego.

Aby zminimalizować liczbę przeprowadzanych kalibracji, można zastosować metodę adaptacyjną lub metodę wykorzystującą logikę rozmytą. W obu metodach następuje dynamiczne wyznaczanie punktów kalibracji. Idea metody adaptacyjnej polega na określaniu odcinka czasu, po upływie którego powinna nastąpić kolejna kalibracja. W zależności od wartości błędu dryftu temperaturowego następuje zmniejszanie lub zwiększanie odcinka czasu pomiędzy kalibracjami o stały współczynnik. W metodzie wykorzystującej logikę rozmytą punkty kalibracji wyznaczane są przez kontroler rozmyty, działający w oparciu o zadane funkcje przynależności i blok reguł wnioskowania. Do opisu działania takiego kontrolera stosuje się zmienne lingwistyczne, przyjmujące wartości w postaci określonego słowa (np. mało, średnio, dużo). W dalszej części niniejszego artykułu przedstawiono problem automatycznej kalibracji w impulsowym dalmierzu laserowym. Omówiono metodę adaptacyjną i metodę wykorzystującą logikę rozmytą oraz przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych.

## 2. AUTOMATYCZNA KALIBRACJA BŁĘDU DRYFTU DALMIERZA LASEROWEGO

Omawiane w artykule metody kalibracji zaimplementowano i przetestowano w impulsowym dalmierzu laserowym, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy impulsowego dalmierza laserowego

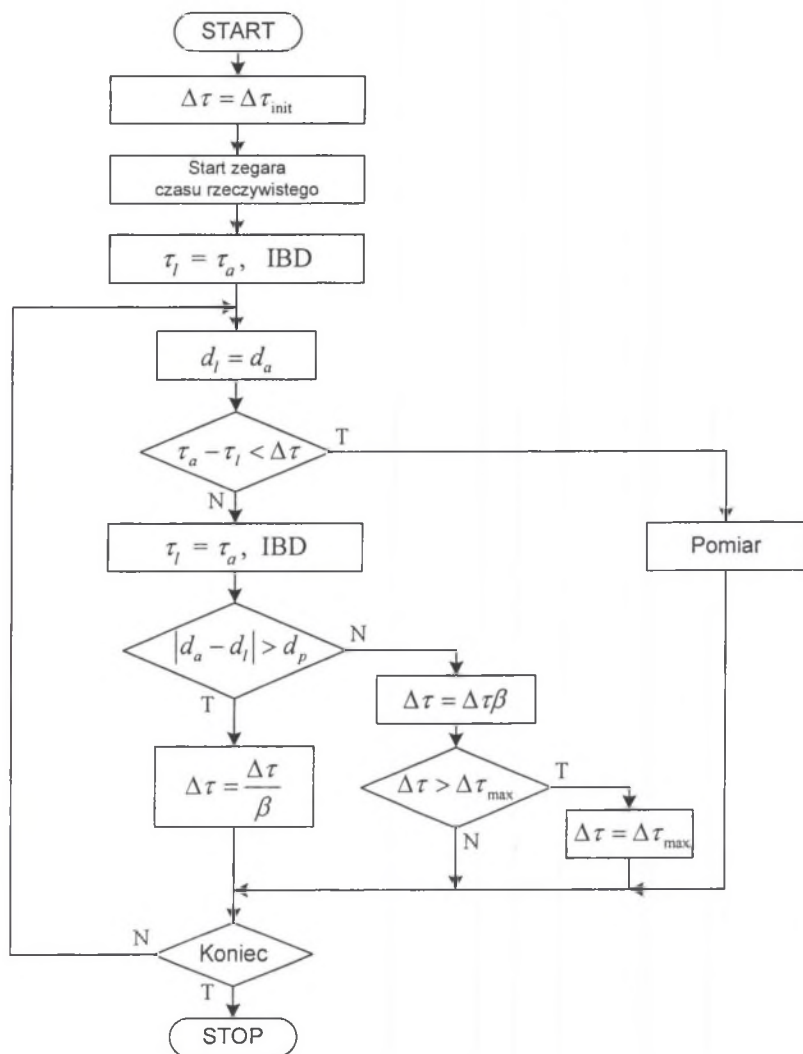
Fig. 1. Simplified block diagram of pulsed laser rangefinder

Wyróżnić w nim można główne bloki: układ optyczny z modułem laserowym, odbiorniki z dyskryminatorami czasowymi oraz precyzyjny miernik czasu. Układ optyczny składa się z dwóch oddzielnych teleskopów: nadawczego i odbiorczego, wykonanych na bazie soczewek firmy *Edmund Industrial Optics* typu DCX. Zastosowano moduł laserowy typu ML100H15 firmy *Power Technology*. Zapewnia on generowanie impulsów o czasie trwania 15 ns i mocy 100 W oraz maksymalnej częstotliwości powtarzania 5 kHz, przy długości fali równej 905 nm. W celu identyfikacji błędu dryftu termicznego w układzie optycznym wprowadzono światłowódowe sprzężenie zwrotne. Konwerter optyczno-elektryczny składa się z dwóch jednakowych torów, zawierających detektor promieniowania (fotodioda lawinowa), przedwzmacniacz, stałofrakcyjny dyskryminator czasowy oraz konwertery ECL/TTL. Wyjścia konwertera są podłączone bezpośrednio do wejść miernika czasu. Sterowaniem oraz przetwarzaniem danych w opisywanym dalmierzu zajmuje się miernik odległości, który składa się ze scalonego licznika czasu FPGA [2] o rozdzielczości równej 200 ps oraz systemu mikroprocesorowego z mikrokontrolerem H8S firmy *Renesas*.

Pomiar odległości polega na pomiarze odcinka czasu pomiędzy impulsem nadanym a odebrany. Po wyzwoleniu lasera zasadnicza część wiązki promieniowania propaguje do celu jako impuls *Start*, a następnie po odbiciu powraca jako impuls *Stop*. Jednocześnie niewielka część wiązki nadawczej jest bezpośrednio transmitowana do teleskopu odbiorczego przez światłowód sprzężenia zwrotnego. W ten sposób każdemu impulsowi *Start* odpowiadają dwa impulsy *Stop*, pierwszy pochodzący ze sprzężenia zwrotnego i drugi odbity od celu. Wprowadzenie sprzężenia zwrotnego umożliwia identyfikację błędu dryftu termicznego.

Przeprowadzone badania wykonanego modelu dalmierza laserowego pokazały, że uzyskany wynik mierzonej odległości do stałego obiektu zmienia się gwałtownie po włączeniu zasilania urządzenia i stabilizuje się po czasie około 60 minut. Ponadto, zniekształcenie wyniku pomiaru występuje również w przypadku zmian warunków termicznych.

Do identyfikacji i kalibracji błędu związanego z dryfem temperaturowym można wykorzystać klasyczną metodę adaptacyjną [5], [6]. Idea metody adaptacyjnej polega na określaniu odcinka czasu  $\Delta\tau$ , po upływie którego powinna nastąpić kolejna kalibracja. Algorytm omawianej metody przedstawiony jest na rys. 2. Zadaniem algorytmu jest adaptacyjne wyznaczanie odcinka czasu  $\Delta\tau$  pomiędzy kolejnymi kalibracjami w zależności od bieżącej wartości błędu dryftu  $d_a$ . Pierwszym krokiem algorytmu jest przypisanie wartości początkowej  $\Delta\tau$  równej  $\Delta\tau_{init}$ , uruchomienie zegara czasu rzeczywistego oraz przeprowadzenie procesu pierwszej identyfikacji błędu długoczasowego (IBD). W procesie IBD wyznacza się wartość błędu dryftu  $d_a$ . Parametr  $d_l$  oznacza ostatnią wartość dryftu i początkowo jest równy  $d_a$ . Czas  $\tau_l$  określa moment realizacji ostatniego procesu IBD, natomiast  $\tau_a$  oznacza czas bieżący. Jeżeli różnica pomiędzy czasem  $\tau_a$  a czasem  $\tau_l$  jest mniejsza od  $\Delta\tau$ , przeprowadzane są właściwe pomiary odległości do obiektu, w przeciwnym przypadku realizowany jest proces IBD. Jeżeli bezwzględna wartość zmiany wartości błędu dryftu jest większa od przyjętej wartości progowej  $d_p$ , następuje zmniejszenie kroku  $\Delta\tau$  proporcjonalnie do wartości współczynnika  $\beta$ , w przeciwnym przypadku wartość  $\Delta\tau$  zostaje proporcjonalnie zwiększona. Maksymalna wartość  $\Delta\tau$  wynosi  $\Delta\tau_{max}$ . Zakończenie działania algorytmu następuje na żądanie użytkownika. W podanym algorytmie współczynnik  $\beta$  nazywany jest współczynnikiem adaptacji. Typowe wartości  $\beta$  zawierają się w przedziale od 1 do 2. Wartość  $\beta = 1$  jest przypadkiem szczególnym, który oznacza kalibrację w równych odcinkach czasu. Wyniki badań eksperymentalnych dla tej metody przedstawiono w p. 4.

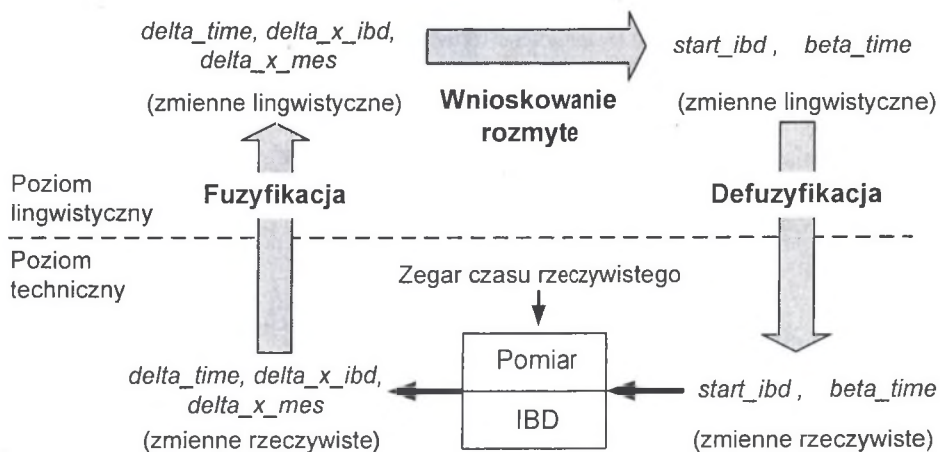


Rys. 2. Algorytm adaptacyjnej kalibracji dryftu termicznego  
 Fig. 2. Flow-chart of the algorithm for adaptive drift error calibration

### 3. WYKORZYSTANIE LOGIKI ROZMYTEJ DO KALIBRACJI DALMIERZA

W systemach z logiką rozmytą (FL) stosuje się informację opisową (lingwistyczną), której podstawowym elementem są zmienne lingwistyczne, przyjmujące wartości w postaci określonego słowa [4]. Każdemu słowu odpowiadają pewne wartości numeryczne  $u$ , określone funkcją przynależności  $\mu_F(u)$ . Funkcja przynależności przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 1. Inną charakterystyczną cechą systemów rozmytych są reguły wnioskowania, określające zależności pomiędzy zmiennymi wejściowymi i wyjściowymi. W zastosowaniach technicznych wielkościami wejściowymi i wyjściowymi są zwykle wartości zmierzone,

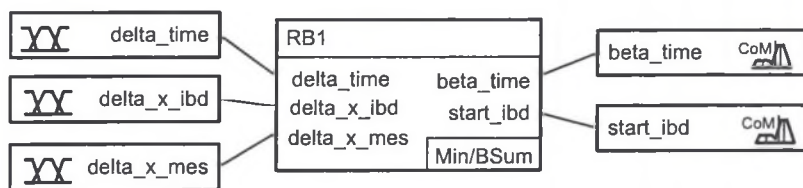
uzależnione względem siebie w sposób nierozmyty. Aby zapewnić współdziałanie zbioru rozmytego z nierozmytym, wprowadza się system rozmyty z tak zwanym fuzyfikatorem na wejściu i defuzyfikatorem na wyjściu [3]. Omawiane elementy systemu rozmytego wykorzystane do kalibracji błędu długoczasowego w dalmierzu laserowym przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Struktura kontrolera rozmytego do kalibracji dalmierza laserowego  
 Fig. 3. The structure of fuzzy logic controller for calibration of laser rangefinder

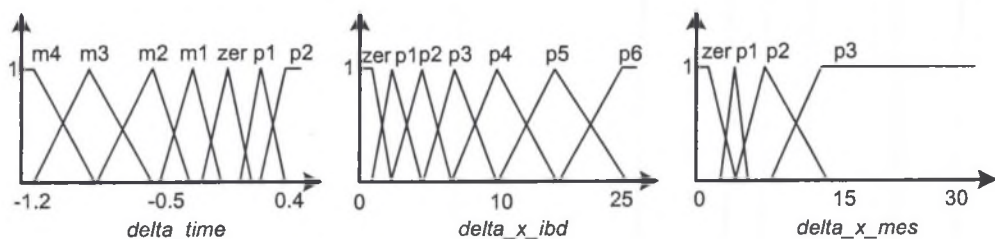
Zadaniem sterownika FL jest wyznaczenie momentów kalibracji dalmierza oraz współczynnika zmian odstępów pomiędzy kalibracjami. Poziom techniczny stanowi głównie część sprzętowo-programowa dalmierza, natomiast poziom lingwistyczny stanowi oprogramowanie kontrolera rozmytego. Wymiana informacji pomiędzy tymi poziomami realizowana jest za pomocą pięciu zmiennych:  $\Delta_{time}$ ,  $\Delta_{x\_ibd}$ ,  $\Delta_{x\_mes}$ ,  $start\_ibd$ ,  $\beta_{time}$ .

Dla kontrolera rozmytego pierwsze trzy zmienne są zmiennymi wejściowymi, a pozostałe zmiennymi wyjściowymi. Zmienna  $\Delta_{time}$  określa unormowany odcinek czasu pomiędzy momentem ostatniej kalibracji i czasem bieżącym a zadaną wartością odcinka czasu pomiędzy kalibracjami. Zmienna  $\Delta_{x\_ibd}$  określa różnicę pomiaru odległości referencyjnej w odniesieniu do wartości z ostatniej kalibracji. Wartość parametru  $\Delta_{x\_ibd}$  wyznaczana jest w procesie identyfikacji błędu długoczasowego (IBD). Zmienna  $\Delta_{x\_mes}$  wyznacza zmianę wartości pomiaru odległości do celu w odniesieniu do ostatniego pomiaru i jest określana w procesie Pomiar. Zmienna wyjściowa  $start\_ibd$  sterownika rozmytego przyjmuje wartość dwustanową, wyznaczającą proces Pomiar lub IBD. Zmienna  $\beta_{time}$  jest współczynnikiem zmian zadanej wartości odcinka czasu pomiędzy kolejnymi kalibracjami. Sterownik rozmyty został zaprojektowany za pomocą oprogramowania *fuzzyTECH*, wersja 5.54e firmy *Inform Software Corporation* [1]. Strukturę opracowanego kontrolera pokazano na rys. 4. Kontroler składa się z pięciu zmiennych i jednego bloku reguł wnioskowania (RB1). Dla każdej zmiennej określono przedział dopuszczalnych wartości, liczbę wartości lingwistycznych oraz funkcje przynależności.



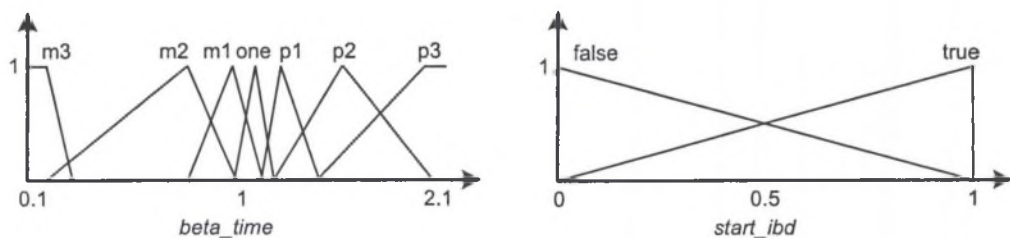
Rys. 4. Struktura kontrolera rozmytego dla oprogramowania *fuzzyTECH*  
 Fig. 4. The fuzzy logic controller in *fuzzyTECH* environment

Na rys. 5 przedstawiono wykresy funkcji przynależności dla zmiennych wejściowych. Jako funkcje przynależności wykorzystano funkcje trójkątne. Zakresy zmian wartości zmiennych wyznaczono na podstawie obserwacji zmian parametrów w czasie pomiarów i identyfikacji błędów długoczasowego.



Rys. 5. Funkcje przynależności zmiennych wejściowych  
 Fig. 5. Membership functions of input variables

Funkcje przynależności dla zmiennych wyjściowych pokazano na rys. 6. Zmienna *start\_ibd* przyjmuje wartość 1, co oznacza, że należy wykonać proces IBD lub wartość 0, wyznaczającą pomiar odległości do celu. W pewnych warunkach występują również wartości pośrednie, które wyznaczają również pomiar odległości. Dla zmiennej *beta\_time* wartości mniejsze od 1 oznaczają skrócenie odcinka czasu pomiędzy kolejnymi kalibracjami a wartości większe od 1 jego wydłużenie. Cechą charakterystyczną zbioru m3 dla zmiennej *beta\_time* jest niesymetryczna funkcja trapezoidalna, która umożliwia gwałtowne, około dziesięciokrotne, zmniejszenie odcinka czasu pomiędzy kalibracjami. Jest to wykorzystywane w sytuacjach dużego gradientu wartości mierzonej odległości.



Rys. 6. Funkcje przynależności zmiennych wyjściowych  
 Fig. 6. Membership functions of output variables

Istotnym problemem sterownika rozmytego jest właściwe określenie reguł wnioskowania. Ogólny zapis reguły ma postać:

*jeśli* przesłanka logiczna *to* konkluzja.

W tabeli 1 przedstawiono reguły wnioskowania sterownika rozmytego do kalibracji dalmierza laserowego. W wykorzystywanym oprogramowaniu *fuzzyTECH*, oprócz samych reguł wnioskowania, istnieje możliwość określania wagi reguły.

Tabela 1

Zbiór reguł wnioskowania sterownika rozmytego do dalmierza laserowego

Jeśli			to			
<i>delta_time</i>	<i>delta_x_ibd</i>	<i>delta_x_mes</i>	waga	<i>beta_time</i>	waga	<i>start_ibd</i>
m4		zero			1,00	false
m3		zero			1,00	false
m2		zero			1,00	false
m1		p1			1,00	false
zero					1,00	false
p1					0,90	true
p2					1,00	true
		p3	1,00	m3	1,00	true
	zero	p1	1,00	p3		
	p1		0,70	p2		
	p2		0,80	p1		
	p3		1,00	jeden		
	p4		0,70	m1		
	p5		1,00	m1		
	p6		1,00	m2		

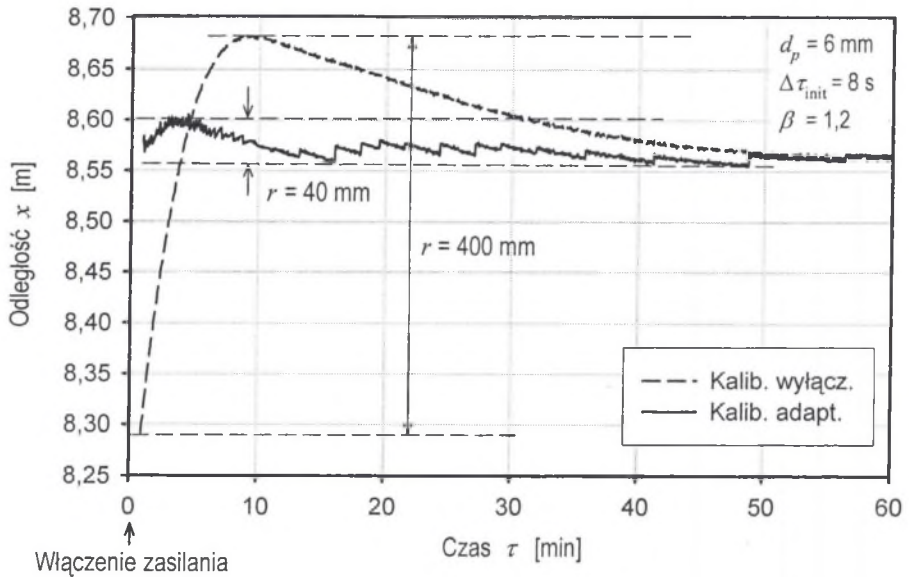
O jakości sterowania rozmytego decyduje właściwe wyznaczenie funkcji przynależności dla zmiennych i bloku reguł wnioskowania. Oprogramowanie *fuzzyTECH* umożliwia interaktywne symulowanie sterownika rozmytego oraz ma wbudowane mechanizmy optymalizacji procesu sterowania. Dzięki temu istnieje możliwość wygodnej i szybkiej implementacji oraz optymalizacji złożonych procesów sterowania w systemach wykorzystujących logikę rozmytą.

#### 4. WYNIKI EKSPERYMENTALNE

Błąd długoczasowy rozważanego dalmierza spowodowany jest głównie dryftem temperaturowym konwertera optyczno-elektrycznego. Aby utrzymać pożądaną dokładność pomiaru w szerokim zakresie temperatur, konieczne jest zastosowanie automatycznej kalibracji błędu długoczasowego. W tym celu wprowadzono optyczne sprzężenie zwrotne, które umożliwi pomiar dryftu temperaturowego całego toru odbiorczo-nadawczego łącznie z licznikiem czasu. Automatyczna kalibracja błędu długoczasowego polega na bieżącym wyznaczaniu momentów kalibracji, w których następuje proces identyfikacji dryftu (IBD). Do kalibracji zastosowano klasyczną metodę adaptacyjną (metoda AD) oraz metodę wykorzystującą logikę rozmytą (metoda FL). Weryfikację skuteczności tych metod przeprowadzono w rzeczywistym systemie pomiarowym z modelem dalmierza laserowego.

Pomiary wykonano w typowych warunkach bez zakłóceń termicznych (warunki W1) oraz w warunkach zakłócenia termicznego (W2), polegającego na włączeniu wentylatora. W pierwszej kolejności przebadano skuteczność metody adaptacyjnej AD.

Na rys. 7 przedstawiono wykres zmian wartości średniej pomiaru odległości, przy włączonej i wyłączonej kalibracji, metodą AD, w warunkach W1, w funkcji czasu  $\tau$  po włączeniu zasilania.

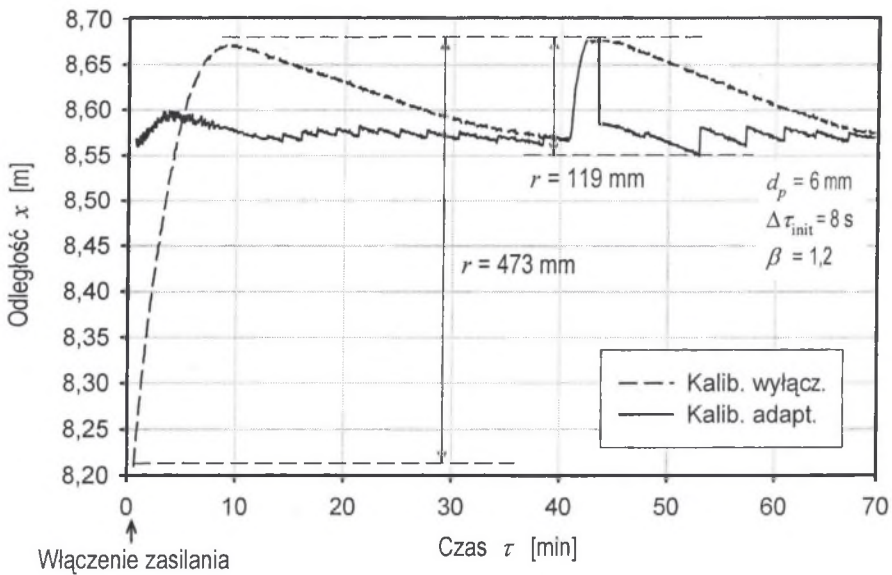


Rys. 7. Zmiany wartości średniej odległości po zastosowaniu metody AD w warunkach W1  
Fig. 7. Drift error for method AD for conditions W1

W początkowych dziesięciu minutach po włączeniu zasilania następuje duża zmiana mierzonej odległości. Rozstęp wartości średniej  $r$ , w badanym zakresie czasowym, wynosi 400 mm. Stabilizacja wyniku pomiaru następuje po czasie około 50 minut. Zastosowanie adaptacyjnej kalibracji błędów długoczasowego umożliwiło 10-krotne zmniejszenie wartości rozstępu. Otrzymane wyniki uzyskano dla następujących wartości algorytmu:  $d_p = 6$  mm,  $\Delta\tau_{\text{init}} = 8$  s,  $\beta = 1,2$ . Charakterystyczne uskoki pokazane na wykresie z kalibracją adaptacyjną (linia ciągła) wskazują na momenty przeprowadzania kalibracji. Proces kalibracji najczęściej przeprowadzany jest w początkowych minutach pracy systemu, co jest spowodowane dużym dryftem temperaturowym. Po czasie 40 min, kiedy następuje stabilizowanie się systemu, można zaobserwować długi odcinek czasu pomiędzy kalibracjami (około 10 min). Sytuacja taka powoduje, że jeśli wystąpi nagle zmiana temperatury w czasie pomiędzy kalibracjami, spowoduje to dużą zmianę wyniku pomiaru.

Na rys. 8 pokazano przypadek, w którym nastąpiło zewnętrzne zaburzenie termiczne, wywołane włączeniem wentylatora. Na pokazanej charakterystyce, po czasie około 40 min, można zaobserwować wyraźną zmianę wartości mierzonej odległości. Maksymalny rozstęp średniej odległości, od momentu włączenia zasilania, wynosi 473 mm. W omawianych warunkach zastosowano kalibrację metodą adaptacyjną z takimi samymi parametrami jak dla warunków W1.



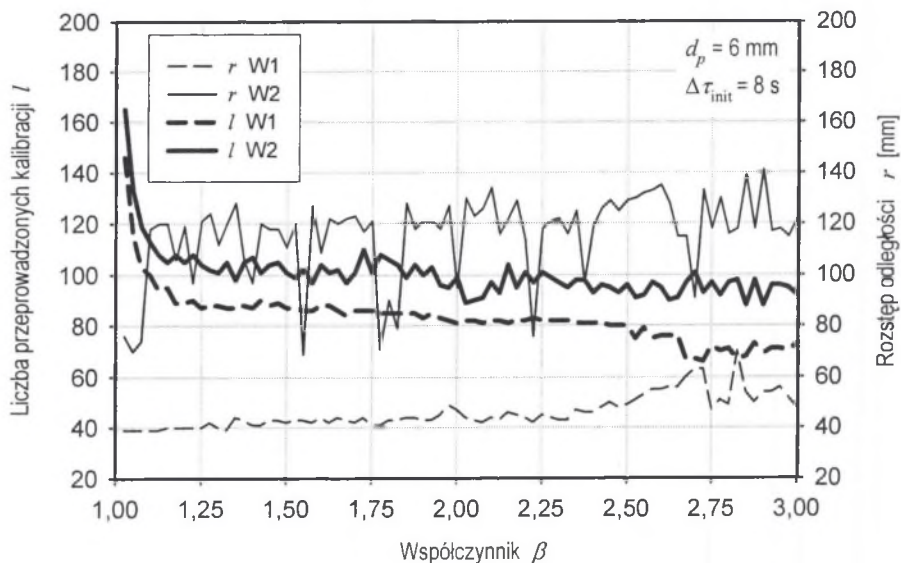


Rys. 8. Zmiany wartości średniej odległości po zastosowaniu metody AD w warunkach W2  
Fig. 8. Drift error for method AD for conditions W2

Zastosowanie adaptacyjnej kalibracji błędów długoczasowego dla warunków W2 umożliwiło 4-krotne zmniejszenie rozstępu zmian mierzonej odległości. Jednak metoda AD okazała się nieskuteczną w przypadku gwałtownych zmian dryftu podczas stabilizowania się systemu. Wniosek ten potwierdza analiza wpływu wartości współczynnika  $\beta$  na wartość rozstępu  $r$  mierzonej odległości, dla warunków W1 i W2. Wyniki przedstawiono na rys. 9, gdzie pokazano również wpływ parametru  $\beta$  na liczbę przeprowadzonych kalibracji  $l$ .

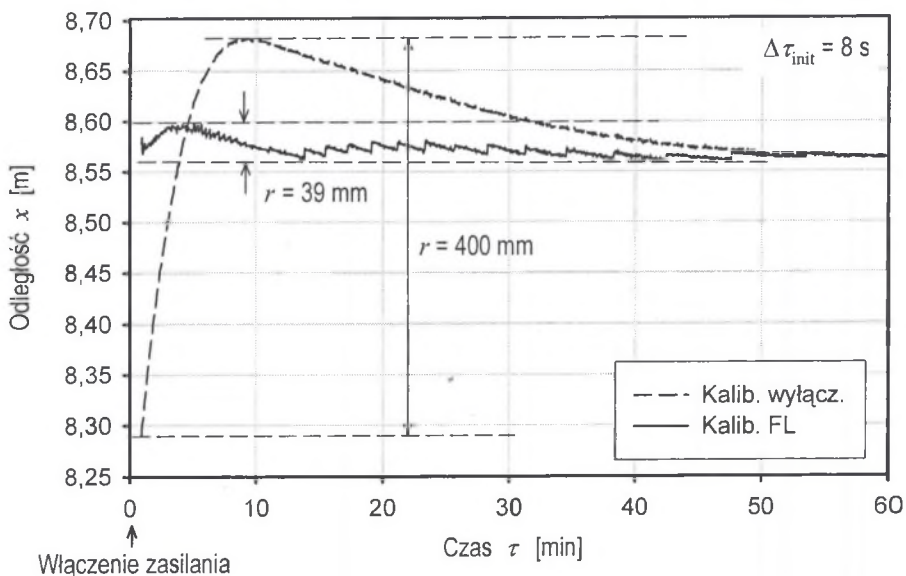
Dla warunków W1 występuje nieznaczny wzrost parametru  $r$  wraz ze wzrostem współczynnika  $\beta$ . Jednocześnie maleje liczba przeprowadzanych kalibracji  $l$ . Optymalną wartością współczynnika  $\beta$  jest wartość równa około 1,2, dla której występuje mały rozstęp mierzonej odległości (około 40 mm) i niewielka liczba kalibracji (około 90). W badanym zakresie czasu, tj. 60 min dla warunków W1, liczba wszystkich przeprowadzonych pomiarów wynosi 1070, co oznacza, że średnio na jedną kalibrację przypada około 12 pomiarów.

Na przedstawionych charakterystykach dla warunków W2 można zaobserwować wyraźnie większą wartość rozstępu  $r$  i liczbę przeprowadzanych kalibracji  $l$ . Wartość parametru  $r$  w dużym stopniu zależy od współczynnika  $\beta$ . Minimalna wartość rozstępu  $r$  wynosi około 70 mm, ale występuje tylko dla kilku wartości parametru  $\beta$ . Średnia wartość  $r$  jest na poziomie około 110 mm, i jest niemal 3-krotnie większa w odniesieniu do warunków W1.



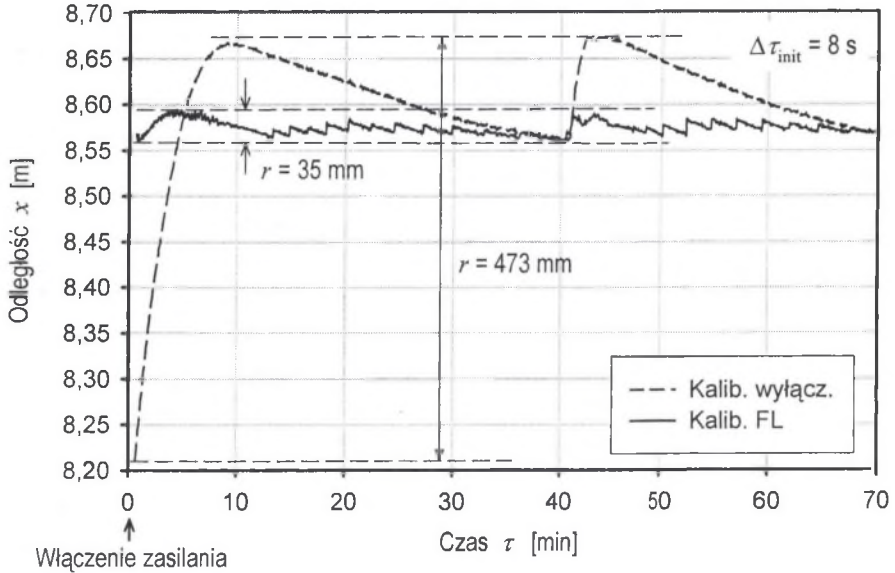
Rys. 9. Wpływ współczynnika  $\beta$  na efektywność kalibracji  
 Fig. 9. Influence the coefficient  $\beta$  for effectiveness of calibration

Alternatywą do adaptacyjnej metody kalibracji błędu długoczasowego jest metoda wykorzystująca logikę rozmytą (FL). Na rys. 10 przedstawiono efekt działania kalibracji FL dla warunków W1. Uzyskano niemal takie same wyniki jak dla metody adaptacyjnej.



Rys. 10. Zmiany wartości średniej odległości po zastosowaniu metody FL w warunkach W1  
 Fig. 10. Drift error for method FL for conditions W1

Wyniki działania metody FL dla warunków W2 pokazano na rys. 11. Dzięki zastosowaniu kontrolera rozmytego rozstęp mierzzonej odległości  $r$  zmniejszył się ponad 13-krotnie i jest niemal 4-krotnie mniejszy niż w metodzie adaptacyjnej.



Rys. 11. Zmiany wartości średniej odległości po zastosowaniu metody FL w warunkach W2  
Fig. 11. Drift error for method FL for conditions W2

W opracowanej metodzie FL uzyskano mniejsze wartości rozstępów  $r$  (max-min), jednak wymagała ona większej liczby procesów kalibracji  $l$ , zwłaszcza dla warunków W2. Zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Wyniki metod kalibracji błędu długoczasowego

Warunki pomiarowe	Kalibracja wyłączona		Kalibracja włączona			
			Metoda adaptacyjna		Metoda Fuzzy Logic	
	$r$ [mm]	$l$	$r$ [mm]	$l$	$r$ [mm]	$l$
W1	400	-	40	89	39	95
W2	473	-	119	105	34	141

Zaproponowany kontroler FL nie wyczerpuje możliwości wykorzystania logiki rozmytej do kalibracji błędu długoczasowego. Istnieje możliwość łatwego wprowadzenia innych zmiennych, modyfikacji i optymalizacji reguł wnioskowania. Dzięki swojej uniwersalności kontrolery rozmyte można stosować również w innych obszarach zastosowań w dalmierzu laserowym.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule metody kalibracji skutecznie zmniejszają błąd dryftu temperaturowego w impulsowym dalmierzu laserowym. Dla warunków środowiskowych W1 nastąpiła kilkukrotna poprawa dokładności pomiaru odległości. Dla warunków W2 lepszą dokładność uzyskano dla metody wykorzystującej logikę rozmytą, co potwierdza jej większą skuteczność w przypadkach nagłych zmian warunków termicznych. Metoda FL wymaga bardziej złożonych obliczeń programowych niż metoda adaptacyjna. Jednak, w odniesieniu do całego procesu pomiarowego, wymagany czas na obliczenia jest znikomo mały. Zaletą metody wykorzystującej logikę rozmytą jest również to, że nie wymaga ona tworzenia klasycznych modeli matematycznych procesu kalibracji.

## Literatura

1. Inform Software Corp.: *fuzzyTECH 5.5 User's Manual*. INFORM GmbH 2001.
2. Kalisz J., Pełka R., Poniecki A.: *Precision time counter for laser ranging to satellites*. Review of Scientific Instrum., vol. 65, no. 3, p. 736-741, March 1994.
3. Osowski S.: *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*. WNT, Warszawa 1996.
4. Patyra M.J., Mlynek D.M.: *Fuzzy Logic Implementation and Applications*. Wiley, New York 1996.
5. Pełka R.: *Adaptive Calibration of Time Interval Digitizer with Picosecond Resolution*. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 40, no. 2, p. 502—504, 1991.
6. Sondej T., Pełka R.: *Data processing and calibration in precision laser rangefinder*. Proc. Optoelectronic Distance Measurement and Applications, Pavia, p. 124—129, Sep. 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Jakubiec

Wpłynęło do Redakcji dnia 7 grudnia 2004

## Abstract

In order to obtain required level of accuracy in modern measurement instrument, an appropriate calibration is needed. As an example, one can consider a pulsed laser rangefinder, in which an accuracy of measurements depends on the changes of ambient temperature. Since the error due to the temperature changes is a long-time error, it may be compensated by repetitive calibrations. This calibration is based on the measurement of a known distance which is then used as a correction term when user measurements are performed. To minimize the number of calibration points we used adaptive method (Fig. 2) and/or fuzzy logic calibrator (Fig. 3). In both methods the calibration interval is calculated as a dynamic variable. The methods for calibration presented in this paper effectively decrease the influence of drift error in pulsed laser rangefinder. Fuzzy calibrator is more effective in a case of rapid changes of temperature (Fig. 11). An important advantage of fuzzy calibration is its heuristic algorithm that does not require any mathematical model of calibration process.