

System do stabilizacji temperatury w przestrzeni pomiarowej interferometru

mgr inż. Mariusz ŻABA

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej na specjalności Metrologia i Komputerowe Systemy Pomiarowe w 2005 r. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się pomiarami długości oraz względnej niestabilności długości fali światła diod laserowych



e-mail: m.zaba@mchtr.pw.edu.pl

dr inż. Olga IWASIŃSKA

Studia magisterskie ukończyła 1999 r na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych. W 2000 roku rozpoczęła studia doktoranckie. Doktorat obroniła 2005 r. Interesuje się interferencyjnymi technikami pomiarowymi długości.



e-mail o.iwasinska@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

W referacie przedstawione został system stabilizacji temperatury przeznaczony do zastosowania w pomiarach interferencyjnych długości (przemieszczenia). W tym celu zbudowano komorę termoizolacyjną wyposażoną w moduł Peltiera z układem sterowania. Założono, że układ powinien zapewnić, przez co najmniej 8 godzin, stabilizację termiczną na poziomie nie gorszym niż $\pm 0,05$ °C. Opisano dwa rozwiązania i wyniki badań stabilności temperatury w obu układach.

Słowa kluczowe: stabilizacja termiczna, pomiar długości

Temperature stabilization system of the measuring space of an interferometer

Abstract

In this paper a system of active stabilization of sealed chamber is presented. Electronically controlled Peltier module is applied. The system is predestined for the interferometer to minimize the effect of refractive index variations and thermal expansion correction. Uncertainty of corrections is a potentially large source of error. Performing the length measure at $20 \pm 0,5$ °C and long term stability $0,05$ °C could significant reduced influences of sources. Two solutions are presented and results of temperature stabilization testing.

Keywords: thermal stabilization, length measurement

1. Wprowadzenie

Jednym z istotnych problemów w metrologii geometrycznej jest wpływ temperatury na wynik pomiaru. Rozszerzalność temperaturowa zmienia wymiary geometryczne elementów. Porównywalność wyników osiągana jest dzięki odniesieniu ich do temperatury 20°C przez uwzględnienie odpowiednich poprawek m.in. na rozszerzalność cieplną i długość wzorcowej fali w ośrodku. Niepewność wyznaczenia poprawki stanowi często istotny składnik całkowitej niepewności pomiarów (zwłaszcza w przypadku wysokiej dokładności pomiarów wzorców końcowych). W niniejszym referacie przedstawiono wyniki prac nad układem aktywnej stabilizacji termicznej otoczenia pomiarowego interferometru do pomiarów długości np. wzorców końcowych lub innych układów przeznaczonych do pomiaru przemieszczenia.

Wzorcem w interferencyjnych pomiarach geometrycznych jest częstotliwość światła w próżni, której względna niestabilność dla typowego lasera metrologicznego jest rzędu 10^{-8} - 10^{-9} . Długość fali światła laserowego, która w tego typu pomiarach jest wzorcem ściśle zależy od tzw. współczynnika załamania ośrodka, który dla próżni równy jest jedności. Współczynnik załamania światła dla

powietrza jest wyliczany przy użyciu empirycznych zależności [1-3] na podstawie zmierzonych wartości temperatury, wilgotności, ciśnienia powietrza. Przy zastosowaniu kompensacji zmian współczynnika załamania, na podstawie wskazań czujników uzyskuje się względną niepewność pomiaru długości (przemieszczenia) na poziomie $(0,3-2) \cdot 10^{-6}$. Najsilniej wpływającym składnikiem niepewności jest temperatura co wynika najczęściej ze zmienności jej rozkładu w przestrzeni pomiarowej. Dla zapewnienia podanej dokładności pomiaru długości i przemieszczenia temperatura powinna być wyznaczana z niepewnością nie gorszą niż 0,1 °C na całej długości wiązki laserowej. Drugim czynnikiem mającym wpływ na dokładność wyznaczenia długości jest niepewność oszacowania poprawki na rozszerzalność cieplną materiału, z którego wykonano element sprawdzany (liniał, wzorzec itp.). W prezentowanych badaniach testowano możliwość stabilizacji i pomiaru temperatury stalowej płytki wzorcowej o nominalnej długości 100 mm. Wzorzec tego typu został wybrany ze względu na prowadzone w IMiSP badania układu do testowania wzorców końcowych przy użyciu metody zliczania prążków interferencyjnych [4]. Wybór ten jest uzasadniony także faktem, że w praktyce pomiarowej najczęściej stosowane są wzorce końcowe wykonywane ze stali. Zgodnie z normą PN-EN ISO 3650 [5] powinny one mieć współczynnik rozszerzalności cieplnej $(11,5 \pm 1) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ w zakresie temperatury $10 \div 30$ °C. Niepewność wyznaczenia tego współczynnika przenosi się na niepewność oszacowania poprawki na rozszerzalność cieplną. W praktyce temperatura płytek o nominalnej długości 10 mm klasy dokładności 0 powinna znajdować się w przedziale $20 \pm 0,5$ °C i być wyznaczana z niepewnością nie gorszą niż 0,05 °C. Wymagania te stanowiły założenia dla tworzonego systemu stabilizacji.

Klimatyzacja laboratorium IMiSP pozwalała zmieniać temperaturę w zakresie $15 \div 30$ °C jednak nie zapewniała dostatecznej stabilizacji jej rozkładu dla potrzeb pomiarów interferencyjnych. Dla zapewnienia możliwie stałych warunków otoczenia zaprojektowano komorę wyposażoną w system do aktywnej stabilizacji temperatury powietrza i pośrednio wszystkich elementów, które będą się w nim znajdować. System ten wykorzystywał moduł Peltiera jako pompę cieplną za pomocą, której zadawano zmiany temperatury. Elektronika systemu była oparta o programowalny ośmiobitowy mikrokontroler Atmega8. Założono, że docelowo część optyczną interferometru do testowania wzorców końcowych [4] zostanie zamknięta w przestrzeni komory a wymagane przemieszczenia w obrębie interferometru będą zadawane zdalnie. Zmiana temperatury powietrza w komorze powodowały nagrzewanie lub chłodzenie elementów optycznych i mechanicznych interferometru a także elementu mierzzonego.

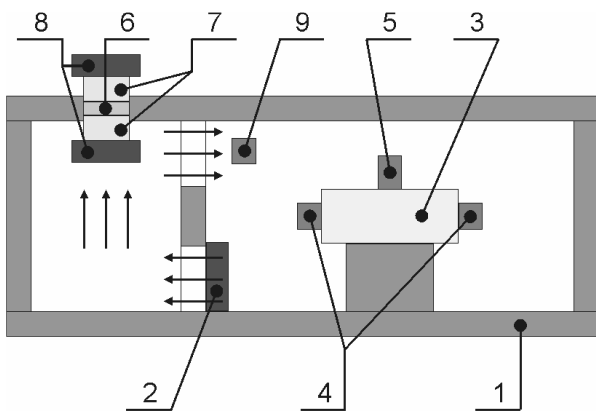
2. Budowa komory do stabilizacji temperatury

Podjęto próbę stabilizacji temperatury w komorze w układzie z wymuszoną cyrkulacją powietrza w przestrzeni pomiarowej a następnie zmodyfikowano układ dodając do wnętrza pierwszej komory drugą, wykonaną z takiego samego materiału jak pierwsza. Przepływ energii cieplnej pomiędzy komorami zapewniał wbudowany w ściankę wewnętrznej komory aluminiowy radiator.

2.1 Stabilizacja z wymuszonym przepływem powietrza w przestrzeni pomiarowej

Zbudowano komorę 1 (rys. 1) o wymiarach 450x300x200 mm z materiału termoizolującego (stryroduru). Grubość ścianek komory wynosiła 30mm. Komora została podzielona na dwie części. W ścianie rozdzielającej wykonano dwa otwory, przez które była wymuszana cyrkulacja powietrza za pomocą wentylatora 2. Jedna z części pełniła rolę przestrzeni, w której umieszczony ma być interferometr, w niej znajdowała się płytka wzorcowa 3 o długości 100 mm. Temperaturę wzorca mierzono dwoma czujnikami 4. Czujnik 5 zamocowany nad płytką, mierzył temperaturę otaczającego ją powietrza. W warunkach pomiarów interferencyjnych czujniki te służą do kompensacji rozszerzalności cieplnej oraz długości fali w powietrzu. W celu oceny działania systemu stabilizacji sygnał z tych czujników rejestrowano w czasie.

W drugiej części komory znajdowała się pompa ciepła. Użyty do jej budowy moduł Peltiera 6 umieszczono w zewnętrznej ścianie komory. Po obu jego stronach znajdowały się radiatory 7 z wentylatorami 8, które wspomagały wymianę energii cieplnej z otaczającym je powietrzem. W strumieniu powietrza wypływającym z tej części komory znajdował się czujnik temperatury 9, przeznaczony do obsługi układu sterowania modułem Peltiera.



Rys.1. Komora do stabilizacji temperatury
Fig.1. Temperature stabilization chamber

W stanowisku użyto moduł Peltiera PM-40x40-89 o wymiarach 40x40 mm i mocy 89W. Elementy czynne modułu, wykonane z półprzewodnikowego tellurku bizmutu, połączone są naprzemian za pomocą warstw miedzi. Całość okrywają z dwóch stron płytki ceramiczne. Jedna z płytek ceramicznych modułu ulega ogrzaniu, druga ochłodzeniu a zespół radiatorów 7 i wentylatorów 8 rozprowadza energię do komory i otoczenia. W zależności od kierunku polaryzacji napięcia zasilania po każdej stronie zespołu Peltiera można uzyskać temperaturę zarówno wyższą jak i niższą od otoczenia. Po stronie cieplej sumowana jest energia przepływająca ze strony chłodzonej i powstaje wewnątrz modułu na skutek przepływu przez niego prądu elektrycznego (ciepło Joule'a). Warunkiem efektywnej pracy modułu jest zatem zapewnienie skutecznego odprowadzanie ciepła.

Napięcie zasilania modułu Peltiera kształtowano z wykorzystaniem 8-bitowego mikrokontroleraem Atmega8 za pomocą techniki PWM - Pulse Width Modulation [6,7], czyli regulacji wypełnienia prostokątnego sygnału sterującego. Wypełnienie sygnału w obrębie jednego okresu mogło się zmieniać w zakresie od 0 do 1024, przy czym 0 oznacza brak jakiegokolwiek zasilania modułu, zaś 1024 odpowiada zasilaniu napięciem stałym. Jeden okres modulacji PWM trwał 1 ms. Takie rozwiązanie pozwalało na zmianę mocy chłodzenia modułu z rozdzielczością około 80mW, a co za tym idzie możliwe było uzyskanie zmian temperatury powierzchni płytek Peltiera z krokiem mniejszym niż 0,01°C. Dwie strony modułu Peltiera mają różną temperaturę. Tuż po zaniku przepływu prądu następuje przepływ energii cieplnej ze strony ciepłej do zimnej dążąc do wyrównania temperatur obu stron modułu. Krótki czas okresu PWM dobrano tak by zminimalizować to zjawisko.

Zastosowany moduł pobierał około 10A prądu, dlatego jako klucza elektrycznego (sterowanego przez mikrokontroler) załączającego moduł użyto tranzystora unipolarnego [8] MOSFET. Charakteryzuje się on bardzo niskim oporem wewnętrznym (na poziomie 0,02Ω dla tranzystora zastosowanego w układzie) przy pełnym „otwarciu”. Zastosowanie tego typu tranzystora wynikało z niskiego oporu elektrycznego modułu, którego wartość nie przekraczała jednego Ohma. Rozwiązanie to pozwalało zminimalizować straty ciepła w układzie sterowania modułem. Dodatkowo, tranzystor unipolarny ma bardzo krótki czas potrzebny do pełnego otwarcia, co umożliwiała na skrócenie okresu wypełnienia sygnału sterującego (PWM).

Sygnał pomiarowy z półprzewodnikowego czujnika temperatury LM35 miał charakter napięciowy [9] i zmieniał się o 10mV/°C. Wartość tej zmiany była ustalona na stałe przez producenta. Czujnik ten jest fabrycznie wstępnie wykalibrowany dla temperatury 25°C z niepewnością w granicach 0,5 °C i dla tej temperatury podaje napięcie około 250 mV. Długookresowa powtarzalność wskazań jest lepsza niż ±0,08°C, co oznacza, że po kalibracji możliwa jest do uzyskania zadowalająca niepewność pomiaru temperatury ±0,1°C dla zakresu 20±0,5°C.

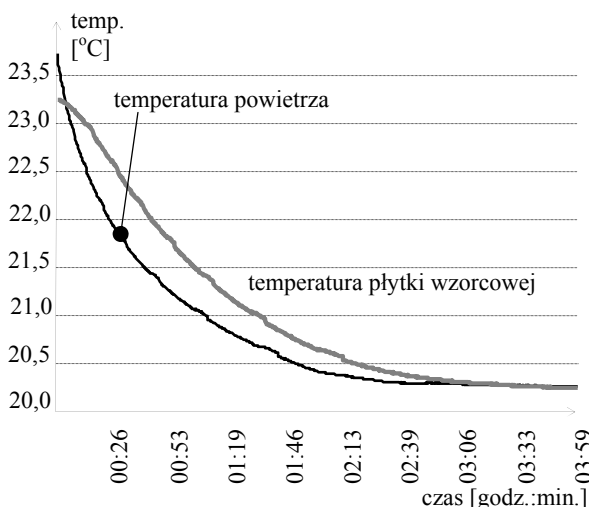
Sygnał z czujnika był wzmacniany i kształtowany przez układ wzmacniaczy operacyjnych tak, aby uzyskać zmiany napięcia równe 0-5V przy zmianach temperatury w zakresie 19,5-20,5°C. Wzmocnienie i offset były tak dobrane, aby wykorzystać cały zakres przetwornika A/C. Pozwalało to uzyskać maksymalną rozdzielczość pomiaru dla danego przedziału temperatury. Tak ukształtowany sygnał był podawany na wejście wbudowanego w mikrokontroler 10 bitowego (1024 poziomy) przetwornika analogowo-cyfrowego A/C.

Napięcie podawane na przetwornik A/C porównywane było z wartością odniesienia wpisaną do programu sterującego mikrokontrolerem. W zależności od otrzymanego wskazania zwiększał lub zmniejszał wypełnienie sygnału PWM o jeden poziom. Odczyt temperatury przez czujnik 9 był dokonywany, co 60 sekund. Wyniki pomiaru temperatury powietrza w komorze (czujnikiem 5) i płytki wzorcowej (czujnikami 4) rejestrowano w pamięci komputera, co około 2 sekundy.

Układ stabilizujący miał za zadanie doprowadzić do zadanej temperatury powietrze i płytke wzorcową a następnie utrzymać tę temperaturę w czasie ośmiu godzin w zakresie ±0,05 °C. Z przyczyn technicznych, na tym etapie badań przyjęto, że zadana temperatura powinna zawierać się w przedziale 19,5-20,5 °C. Na rysunku 2 i rysunku 3 zaprezentowano przykładowe wyniki przeprowadzonych prób stabilizacji w czasie.

W laboratorium panowała temperatura około 23°C. Układ sterujący jest w stanie obniżyć temperaturę powietrza w komorze z prędkością 1°C/min, jednak tak szybka zmiana powodowała powstanie dużych gradientów temperatury w elementach mechanicznych, a co za tym idzie wpływała na stabilność układu optycznego. Obniżenie temperatury o 3 °C przeprowadzono przez około 4 godziny. Taki czas chłodzenia ustalono na podstawie wcześniejszych badań z wykorzystaniem docelowego układu

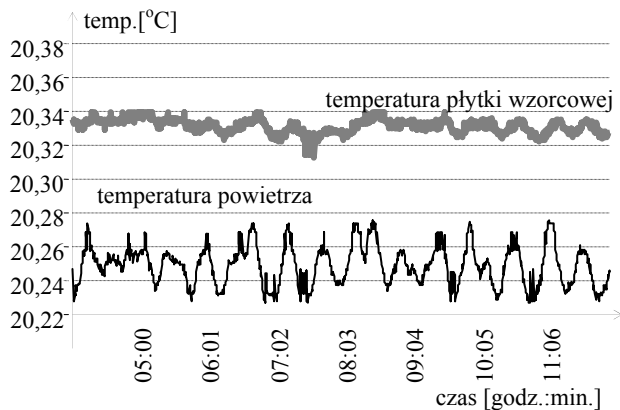
interferometru. Przykładowy wykres zmiany temperatury powietrza i płytki wzorcowej w czasie przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Zmiany temperatury w komorze podczas chłodzenia
Fig.2. Temperature decreasing in the chamber

Chłodzenie płytki wzorcowej (linia szara rys.2) rozpoczęło się w momencie, kiedy temperatura powietrza (linia czarna) spadła poniżej temperatury płytki. W miarę upływu czasu różnica temperatury zmniejszała się, aż do ustabilizowania na poziomie ok. $20,25 \pm 0,05$ °C.

Na rys. 3. przedstawiono zmiany temperatury powietrza i płytki wzorcowej w czasie 8 godzin (wymaganim do stabilizacji i wyrówna temperatury wewnętrznej wzorca). Różnica wskazań czujników $0,1$ °C wynikała z nieuwzględnienia poprawek błędów systematycznych. Poprawki te, przy pomiarze z wykorzystaniem interferencyjnego systemu pomiarowego, wprowadzane są w obsługującym go oprogramowaniu. Z punktu widzenia analizy osiągniętej stabilności odchyłka systematyczna nie ma istotnego znaczenia, więc nie wprowadzono jej ze względu na czytelność wykresu.



Rys. 3. Temperatura w komorze obserwowana w czasie 8 godz.
Fig. 3. Temperature of air and gauge block in the chamber during 8 h

Zakres zmian temperatury powietrza nie przekroczył $0,06$ °C a wyniki uzyskane dla płytki wzorcowej zawierają się w przedziale o połowę mniejszym i nieprzekraczającym $0,03$ °C. Osiągnięty przedział zmienności temperatury był bliski założonemu, lecz zaobserwowano krótkookresową zmienność temperatury powietrza, której charakter wskazywał na wyraźny związek z działaniem sprzężenia zwrotnego układu stabilizacji.

Zmiany te nie były obserwowane na czujniku temperatury stalowej płytki wzorcowej ze względu na jej bezwładność cieplną. Natomiast można oczekiwać, że wpływ zmian temperatury powietrza na kompensację długości fali światła pracującego w komorze interferometru będzie istotny zwłaszcza, że wentylator umieszczony między częściami komory powodował ciągły ruch

powietrza. W związku z tym układ stabilizacji dla zastosowań interferencyjnych musiałby w czasie pomiarów być wyłączany/wyłączany, co mogłoby powodować utratę stabilizacji temperatury.

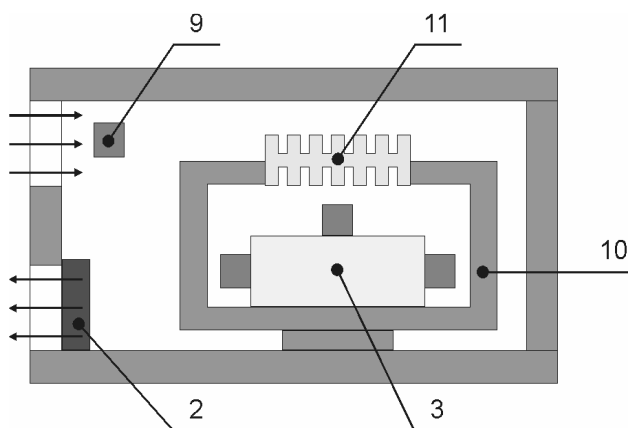
Analiza działania układu doprowadziła do dalszych wniosków dotyczących rozwoju koniecznych zmian w układzie. Postanowiono znacznie uprościć układ elektroniczny odpowiedzialny za pomiar temperatury wykorzystywany do określenia poziomu sterowania modułu Peltiera. Do poprawnej pracy przetwornika A/C, który przetwarzał wzmacniony sygnał z czujnika LM35 potrzebne jest stabilne źródło napięcia referencyjnego oraz nisko-szumowe wzmacniacze operacyjne. Elementy te wraz z niezbędnymi elementami biernymi zwiększają poziom szumów sygnału podawanego do przetwornika A/C. Przetwornik A/C posiada błędy wynikające z procesu digitalizacji oraz nieliniowość charakterystyki przetwarzania. Jego wskazania zależą również od temperatury otoczenia. Referencyjne źródło napięcia omawianego przetwornika A/C również wykazuje podatność na zmiany temperatury.

Po analizie charakterystyk układu LM35 i podobnych handlowo dostępnych scalonych czujników temperatury, okazało się, że czas reakcji tych układów na zmianę temperatury jest dość duża. Zwłaszcza przy różnicach rzędu $0,01$ °C odpowiedź czujnika może wynosić nawet powyżej 4 minut. Umieszczenie czujnika w strumieniu przepływającego powietrza skróciło czas odpowiedzi czujnika, jednak jest to czas na tyle długi (ok. 2 min.), że znacząco wpływa na powstawanie okresowych zmian temperatury powietrza widocznych na rysunku 3. Dodatkowo, płynący przez czujnik LM35 prąd może podgrzać go o $0,08$ °C (dane producenta). Wartość ta może zmieniać się w zależności od temperatury otoczenia.

2.2 Stabilizacja w układzie z podwójną komorą i radiatorem

Ze względu na stabilność i szybkość reakcji do realizacji ostatecznej wersji układu wybrano termistor. Dodatkową jego zaletą są niewielkie wymiary geometryczne (poniżej $3 \times 3 \times 3$ mm), o wpływa na bezwładność cieplną czujnika i podnosi szybkość reakcji na zmianę temperatury otoczenia.

Komora pomiarowa została zmodyfikowana dla zapewnienia większej stabilizacji temperatury powietrza w części pomiarowej.

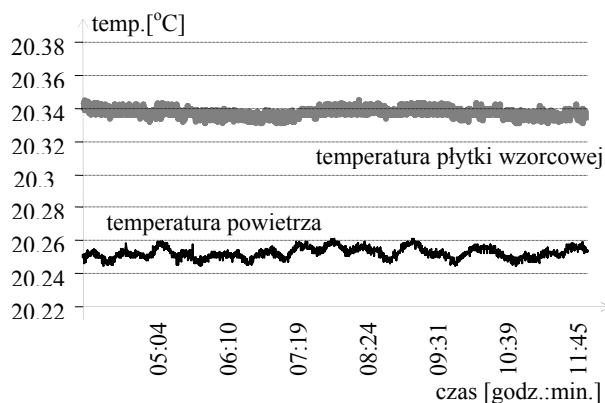


Rys. 4. Zmodyfikowana komora do stabilizacji temperatury
Fig. 4. Modified chamber to temperature stabilization

Na rys. 4, przedstawiającą drugą wersję komory pomiarowej, pominięto jej niezmienną część - z modułem Peltiera. Układ pomiarowy (w badaniu zamodelowany płytką wzorcową), umieszczono w dodatkowej komorze 10 wykonanej z takiego samego materiału jak komora główna-zewnętrzna. Termiczne połączenie pomiędzy komorami zapewniał radiator 11. Pozostałe oznaczenia na rys. 4 są zgodne z opisem rys. 1. Dodatkowo zmieniono system pomiaru temperatury odpowiedzialny za

stabilizację modułem Peltiera. Zrezygnowano ze scalonego przetwornika temperatury i układu A/C w mikrokontrolerze. Jako czujnik, zastosowano termistor NTC 640-10k, który wraz z podłączonym szeregowo rezystorem tworzył układ dzielnika rezystorowego. Napięcie z dzielnika było podawane na jedno z wejść komparatora. Do drugiego wejścia podawane było napięcie odniesienia z dzielnika rezystorowego do budowy, którego wykorzystano stabilne w czasie metalizowane rezystory. Różnica wartości pomiędzy ich rzeczywistą rezystancją a tą podaną przez producenta jest mniejsza niż 0,1%. Szybka odpowiedź termistora na poziomie 2 sekund (dane producenta) minimalizowała okresowe zmiany temperatury.

Z takiego układu, otrzymywano sygnał zerojedynkowy. Stan wysoki oznaczał temperaturę wyższą a niski niższą niż oczekiwana. Sygnał ten trafiał do mikrokontrolera, który sterował



Rys.5. Temperatura w zmodyfikowanej komorze w czasie 8 godz.
Fig.5. Temperature of air and gauge block in the modified chamber during 8

napięciem podawanym na moduł Peltiera. Po wprowadzeniu zmian otrzymano znaczący wzrost stabilizacji temperatury w komorze, przykładowe wyniki zaprezentowano na rys. 5.

W zmodyfikowanym układzie zmiany temperatury powietrza nie przekraczają 0,02 °C a wzorca 0,01 °C. Wyniki te pozwalają stwierdzić, że zaproponowane rozwiązanie techniczne komory do aktywnej stabilizacji temperatury może zostać wykorzystane przy interferencyjnych pomiarach długości wysokiej dokładności np. płytek wzorcowych klasy 0.

Opisany układ z komparatorem jest mało wrażliwy na szumy w układzie zasilania. Na oba dzielniki rezystancyjne podawane jest to samo napięcie a co za tym idzie, zmiana zasilania dzielników napięcia wpływa na nie w stopniu pomijalnym. Eliminuje to problem stabilności zasilania układu komparatora z termistorem. Punkt przełączenia komparatora nie zależy od jego napięcia zasilania i dodatkowo jest niewrażliwy na zmianę temperatury otoczenia. Otrzymywany z komparatora sygnał cyfrowy jest niepodatny na zakłócenia i jest podawany bezpośrednio na jedno z wejść mikrokontrolera.

3. Wnioski

W pierwszej wersji komory uzyskano stabilizację temperatury powietrza na poziomie 0,06°C a płytki wzorcowej 0,03°C, w czasie powyżej 8 godzin przy rozdzielczości pomiaru temperatury 0,01 °C. Na tym etapie badań oceniano stabilność jej rozkładu w czasie i przestrzeni. Uzyskane wartości zmian zapewniają osiągnięcie niepewności pomiarów interferencyjnych na poziomie $5 \cdot 10^{-7}$ [1-3], jednak wymagają zatrzymania systemu stabilizacji temperatury na czas pomiarów interferometrem. Związane jest to z ruchami powietrza, które powstają podczas wymuszonej cyrkulacji przez wentylator.

W pierwszej wersji komory użyto czujnik LM35, który według danych producenta charakteryzują się niepewnością wskazań na poziomie 0,5°C przy temperaturze 25°C. Celem badań było określenie poziomu stabilizacji temperatury, zatem niepewność

wskazań bezwzględnych wartości temperatury ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) tego czujnika nie była przeszkodą. Powtarzalność długookresowa wskazań tych czujników ($\pm 0,08^\circ\text{C}$) jest dostatecznie wysoka dla potrzeb pomiarów interferencyjnych a stały, napięciowy charakter zmian ($10\text{mV}/^\circ\text{C}$) sygnału wyjściowego jest wygodny przy doboru wzmacniaczy i zakresów pomiarowych. Czynniki te zdecydowały o podjęciu prób z czujnikiem LM35 w początkowej fazie badań.

Czujniki użyte do pomiaru temperatury płytki wzorcowej oraz otaczającego ją powietrza były częścią interferencyjnego systemu do pomiaru przemieszczeń. Rozdzielczość ich wskazań wynosiła 0,001 °C zaś niepewność 0,1 °C w zakresie $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, co wykazały badania porównawcze z rtęciowym termometrem wzorcowym w Głównym Urzędzie Miar.

Konstrukcja komory przedstawiona w punkcie 2.1 jest prostsza w porównaniu z drugą wersją (punkt 2.2) i zapewnia większą przestrzeń pomiarową w stosunku do zajmowanego miejsca. Zawiera jednak bardziej złożony układ elektroniczny. Kolejną wadą jest ruch powietrza w przestrzeni pomiarowej, który może wpływać na dokładność pomiarów interferencyjnych. Dodatkowo uwidaczniają się oscylacje temperatury spowodowane działaniem układu sterowania.

W przedstawionej w punkcie 2.2 nowej wersji komory, dzięki zastosowaniu termistora i wyeliminowaniu z układu przetwornika analogowo-cyfrowego, zminimalizowano poziom szumów w stosunku do zmian sygnału użytecznego. Modyfikacje te pozwoliły na zredukowanie okresowych fluktuacji temperatury. Zastosowanie radiatora pełniącego rolę wymiennika ciepła pomiędzy komorami, uśredniło zmiany temperatury przez co dodatkowo zredukowano oscylacje temperatury. Zmiany temperatury powietrza ograniczono do zakresu 0,02 °C. Rozstęp temperatury zmierzonej na powierzchni płytki wzorcowej nie przekroczył 0,01 °C i jest to wartość zbliżona do składowej niepewności pomiaru czujnikiem pochodzącej od szumów. Dodatkową zaletą drugiego rozwiązania jest brak ruchu powietrza w wewnętrznej komorze, co pozwala na stabilną pracę interferometru. Wadą natomiast jest ograniczenie przestrzeni pomiarowej.

Stabilizacja temperatury wokół wewnętrznej komory zapewnia nie tylko niewrażliwość na zmieniające się warunki otoczenia, ale również jest znacznie łatwiejsza do realizacji. Eliminuje się ruchy powietrza w przestrzeni pomiarowej oraz gradienty temperatury.

Praca powstała w ramach grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego 3 T10C 023 30

4. Literatura

- [1] Edlen B., The refractive index of air; Metrologia, vol. 2, no 2, 1966
- [2] Doiron T., Beers J. The gauge block handbook NIST, 1995, 93-102 <http://ts.nist.gov/ts/htdocs/230/233/calibrations/dimensional/pubs/MN180.pdf>
- [3] Lewis A.J. Absolute length measurement using multiple-wavelength phase-stepping interferometry, Praca doktorska UNIVERSITY OF LONDON, 1993 (2002 Re-print edition) <http://jartweb.f2o.org/thesis/Thesis-A-J-Lewis.pdf> s. 197-214
- [4] Iwasińska O. Dobosz M.: Metoda bezwzględnego interferencyjnego pomiaru długości, materiały konferencyjne - Kongres Metrologii, 6-9 września 2004 Wrocław, tom I, s.181-184
- [5] PN-EN ISO 3650 Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS) Wzorce długości płytki wzorcowe sierpień 2000
- [6] Górecki P. Mikrokontrolery dla początkujących, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2006
- [7] Minkina W., Chudzik S.: "Pomiary parametrów cieplnych materiałów termoizolacyjnych - przyrządy i metody", Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, ISBN 83-7193-216-2.
- [8] Hill W. Horowitz P. Sztuka elektroniki (część 1 i 2), Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006
- [9] Rząsa M., Kiczma B. Elektroniczne i elektroniczne czujniki temperatury, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, WKŁ 2005