

doi:10.15199/48.2022.12.19

Długoterminowe badania systemu stabilizacji temperatury w laboratorium wzorców AC-DC

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań stabilności temperatury w elektromagnetycznie ekranowanej kabinie pomiarowej laboratorium wzorców AC-DC, znajdującego się w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Stabilizacja temperatury w kabinie jest realizowana za pomocą oryginalnego systemu stabilizacji, dostosowanego do istniejących pomieszczeń laboratorium. Wyniki zebrano w trakcie ponad 40 miesięcy eksploatacji systemu.

Abstract. The paper presents the results of temperature stability tests in the electromagnetically shielded measuring cabin of the AC-DC standards laboratory located at the Department of Metrology, Electronics and Automation at the Faculty of Electrical Engineering of the Silesian University of Technology in Gliwice. The temperature stabilization in the cabin is realized by means of an original stabilization system, adapted to the existing laboratory rooms. The results were collected during over 40 months of system operation. (**Long-term studies of the temperature stabilization system in the AC-DC standards laboratory.**)

Słowa kluczowe: stabilizacja warunków środowiskowych, klimatyzacja, stabilność długoterminowa.

Keywords: stabilization of environmental conditions, air conditioning, long-term stability.

Wstęp

Bardzo dokładne lub wzorcowe pomiary wielkości elektrycznych są zazwyczaj wykonywane w specjalnie do tego celu przystosowanych pomieszczeniach laboratoryjnych, w których panują określone warunki środowiskowe. Z tego powodu w pomieszczeniach laboratoryjnych instalowane są systemy stabilizacji tych warunków. Jednym z najważniejszych parametrów środowiskowych jest temperatura otoczenia, której zmiany mogą wpływać na wyniki pomiarów. Systemy stabilizujące temperaturę w pomieszczeniach laboratoryjnych są bardziej skomplikowane od komercyjnych systemów klimatyzujących. Jednym z powodów jest konieczność stabilizacji temperatury na poziomie $\pm 0,5^\circ\text{C}$ lub lepszym.

W niniejszej pracy zostaną przedstawione wyniki badań stabilności temperatury w elektromagnetycznie ekranowanej kabinie pomiarowej laboratorium wzorców AC-DC, znajdującego się w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Stabilizacja temperatury w kabinie jest realizowana za pomocą oryginalnego systemu stabilizacji, dostosowanego do istniejących pomieszczeń laboratorium [1].

W laboratorium realizowane są komparacje termicznych przetworników wartości skutecznej (TPWS), które umożliwiają odtworzenie wartości skutecznej napięcia przemiennego metodą podstawienia napięcia stałego o znanej wartości [2,3]. Mimo iż temperaturowe współczynniki napięcia wyjściowego TPWS osiągają znaczne wartości (50 – 100 $\mu\text{V/V}$), pomiary te charakteryzują się bardzo dużą dokładnością, sięgającą 0,1 $\mu\text{V/V}$ [4]. Tak dużą dokładność osiąga się przez stabilizację temperatury pomieszczenia, w którym realizowane są komparacje oraz przez zastosowanie złożonej procedury pomiarowej [5].

Opis systemu stabilizującego temperaturę w kabinie pomiarowej laboratorium wzorców AC-DC

System stabilizacji temperatury, zastosowany w laboratorium wzorców AC-DC, wykorzystuje obieg powietrza ze znaczną recyrkulacją oraz trójobwodowy układ chłodzenia [1], którego głównymi elementami składowymi są:

- agregat wody lodowej z zasobnikiem,
- chłodnica z obiegiem sterowanym zaworem trójdziałnym,

c) wymiennik płytowy, wspomagający instalację przy niższych temperaturach zewnętrznych, w którym czynnikiem chłodniczym jest glikol.

System jest sterowany za pomocą programowalnego sterownika, przeznaczonego do typowych układów klimatyzacji. Zapewnia on realizację algorytmów sterowania elementami regulacyjnymi systemu, takimi jak przepustnice, wentylatory itd. Podstawową wadą zastosowanego sterownika, podobnie jak i innych komercyjnych sterowników przeznaczonych do układów klimatyzacji, jest mała rozdzielczość pomiaru temperatury, wynosząca około $0,3^\circ\text{C}$. Drugim krytycznym elementem składowym toru regulacji jest zespół zaworu trójdziałnego, który jest wykorzystywany w nietypowy sposób. Zazwyczaj system klimatyzujący ma za zadanie utrzymywanie określonej temperatury wewnątrz pomieszczenia przy relatywnie stałej mocy cieplnej wydzielanej wewnątrz klimatyzowanego pomieszczenia. Tymczasem w kabinie pomiarowej laboratorium wzorców AC-DC występuje większa zmienność mocy wydzielanej przez aparaturę pomiarową oraz pracujący w niej personel. Ponadto wymagana jest znacznie lepsza stabilizacja temperatury, rzędu $\pm 0,1^\circ\text{C}$ i to niezależnie od aktualnych warunków atmosferycznych (pogodowych). Oznacza to konieczność odprowadzania ciepła z kabiny („regulacji chłodu”) w znacznie szerszym zakresie niż w przypadku komercyjnych systemów klimatyzujących, co w pewnych warunkach może doprowadzić zawór trójdziałny do funkcjonowania na granicy odcięcia. Na to niekorzystne zjawisko dodatkowo wywiera wpływ nieliniowość i histereza zaworu trójdziałnego. Sytuację komplikuje ograniczona możliwość sterowania istniejącym systemem centralnego ogrzewania pomieszczenia, w którym zlokalizowana jest kabina pomiarowa laboratorium wzorców AC-DC. Sterowanie tym systemem realizowane jest wyłącznie zaworami termostatycznymi, umieszczonymi przy radiatorach ściennych (grzejnikach centralnego ogrzewania).

Największe wymagania odnośnie stabilności temperatury występują wewnątrz kabiny w pobliżu komparowanych TPWS, które są najbardziej wrażliwe na jej zmiany. Z tego powodu w ich pobliżu umieszczono czujnik termometryczny Pt100, którego rezystancja jest mierzona za pomocą multimetru Agilent 34410A wyposażonego w interfejs LAN. Interfejs ten, poprzez infrastrukturę światłowodową laboratorium pozwala na bieżące

monitorowanie temperatury w pobliżu TPWS przy jednoczesnym wyeliminowaniu przewodzonych zakłóceń elektromagnetycznych, występujących na zewnątrz kabiny pomiarowej. Na zewnątrz kabiny zainstalowano system akwizycji danych Agilent 34970A z odpowiednią kartą multipleksera na wejściu. System ten mierzy temperaturę w wybranych kilku punktach pomieszczenia, w którym zlokalizowana jest kabina pomiarowa. Jest to realizowane za pomocą czujników termometrycznych Pt100. Ponadto mierzone są napięcia wyjściowe sterownika sterujące siłownikami, co pozwala na monitorowanie stanu systemu chłodzącego. Dostępne napięcie wyjściowe kasy Agilent 34970A wykorzystano do zwiększenia rozdzielczości układu pomiaru i regulacji temperatury sterownika układu. Archiwizacja wyników pomiaru w trakcie normalnej pracy jest realizowana przy wykorzystaniu prostej aplikacji napisanej w środowisku LabView.

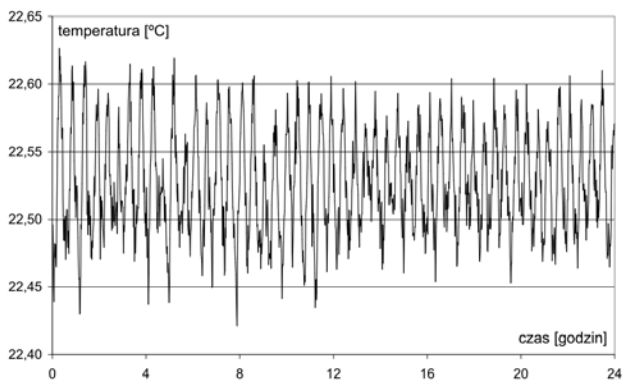
Metodyka badań

W początkowej fazie eksploatacji kabiny testowano różne łatwe w implementacji metody regulacji temperatury w jej wnętrzu oraz badano ich właściwości. Po fazie testów zdecydowano się na zastosowanie komercyjnego sterownika klimatyzacji o zwiększonej rozdzielczości regulacji temperatury, który zapewnił możliwość zdalnego sterowania, autonomiczną obsługę stanów awaryjnych oraz ponowny samoczynny rozruch po zaniku zasilania. Sterownik realizuje kaskadowy algorytm sterowania. Inne testowane metody nie spełniały postawionych wymagań.

W celu przeprowadzenia analizy długoterminowej stabilności temperatury w kabinie, z archiwalnych plików wyodrębniono dobowe zapisy zarejestrowanych wartości temperatury i sygnałów sterujących, które były rejestrowane z odstępem czasowym 10 s. Po wstępnej analizie wyeliminowano z dalszej analizy przedziały czasu w których w kabinie nie realizowano transferów AC-DC lub innych prac pomiarowych oraz interwały, w których wyłączano system stabilizacji temperatury w celu przeprowadzenia prac serwisowych. W przypadku dobowych zmian temperatury brano pod uwagę wszystkie zarejestrowane wyniki, natomiast w przypadku dłuższych interwałów czasu pominięto 5 spośród 6 wyników zarejestrowanych w każdej minucie (aby zachować spójność definicji mezurandu). Powodem była ograniczona liczba rekordów dostępna w arkuszu MS Excel.

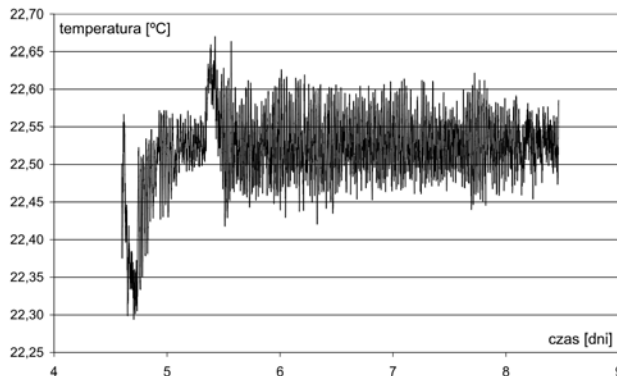
Wyniki badań i ich interpretacja

Analizę rozpoczęto od zbadania dobowego przebiegu zmian temperatury na stanowisku pomiarowym w kabinie w warunkach jej normalnej eksploatacji w dniu 6 stycznia 2018 roku w trakcie realizacji napięciowego transferu AC-DC po opuszczeniu kabiny przez personel.



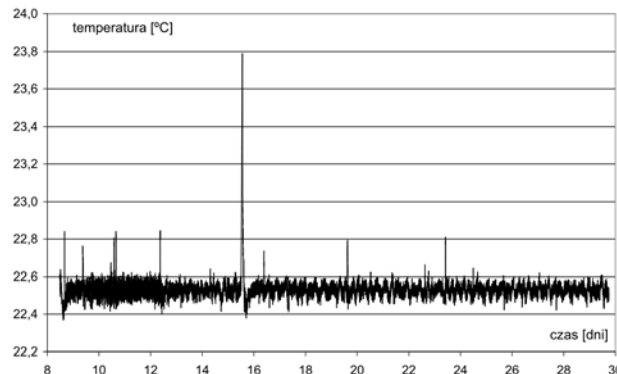
Rys. 1. Dobowa stabilność temperatury w kabinie (6 I 2018)

Widoczne na rysunku 1 wahania temperatury wynikają z cyklicznej pracy agregatu wody lodowej, charakteryzującego się małą mocą oraz nie wyposażonego w zawór upustowy. Okres cyklicznej pracy agregatu w tych warunkach zawierał się w przedziale od około 20 do około 30 minut, w zależności od obciążenia. Występowanie oscylacji ma związek z zastosowanym regulatorem: układ kaskadowy umożliwia wykorzystanie członów dynamicznych dla kompensacji długoczasowych dryftów, natomiast zmiany chwilowe regulowane są członem proporcjonalnym. W tej sytuacji inercja, zdeterminowana objętością chłodnicy i rur ujawnia się w postaci oscylacji. Dla tej konfiguracji systemu stabilizującego temperaturę, amplitudę tych oscylacji można ograniczyć np. poprzez zwiększenie prędkości cyrkulacji wody w obiegu chłodnicy.



Rys. 2. Tygodniowa stabilność temperatury w kabinie (4-9 I 2018)

Na rysunku 2 przedstawiono tygodniowy przebieg zmian temperatury w kabinie, zarejestrowany w dniach od 4 do 9 stycznia 2018 roku. Początkowy fragment przebiegu o czasie trwania około 20 godzin ilustruje odpowiedź instalacji na wznowienie pracy systemu po dłuższej przerwie w użytkowaniu oraz jego reakcję na intensywną wentylację spowodowaną otwarciem drzwi w trakcie rekonfiguracji przez personel układu pomiarowego w kabinie w dniu 5 stycznia. Przedstawiony na rysunku 3 miesięczny przebieg temperatury jest kontynuacją serii pomiarowej przedstawionej na rysunku 2.

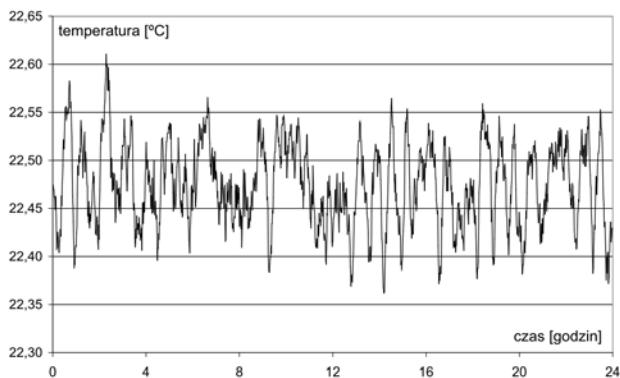


Rys. 3. Kilkutygodniowa stabilność temperatury w kabinie (8-30 I 2018)

Przebieg temperatury zarejestrowany w kabinie w ciągu miesiąca ukazuje zdarzenia niedostrzegalne w przypadku obserwacji przeprowadzanych w krótszych okresach czasu. Należą do nich np. reakcja systemu na rekonfigurowanie przez personel laboratorium układu pomiarowego w dniu 15 stycznia. Reakcja jest spotęgowana przez zwiększoną wymianę powietrza, spowodowaną otwarciem drzwi kabiny. Widoczne są także pojedyncze zaburzenia temperatury o

amplitudzie sięgającej $0,2^{\circ}\text{C}$, których przyczyny są nieznanne.

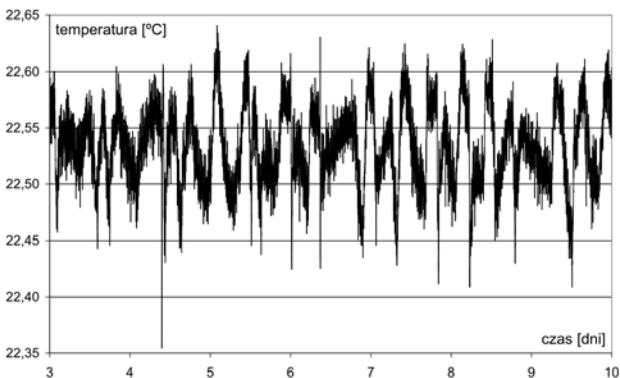
Przedstawione powyżej przykładowe zarejestrowane przebiegi czasowe temperatury w kabinie zostaną obecnie porównane z podobnymi przebiegami zarejestrowanymi około trzy i pół roku później w innej porze roku. Na rysunku 4 przedstawiono dobowy przebieg zmian temperatury w kabinie, zarejestrowany podczas normalnej realizacji transferu AC-DC bez wzmacniacza mocy Fluke 5205A i po opuszczeniu kabiny przez personel, ale w okresie letnim. Porównanie z rysunkiem 1 nie ujawnia żadnych istotnych różnic tych przebiegów. Jedyna widoczna zmiana polega na nieco odmiennym przebiegu oscylacji, co spowodowane było znacznie większym zapotrzebowaniem na czynnik chłodzący, a co za tym idzie na większe otwarcie zaworu trójdzielnego.



Rys. 4. Dobowa stabilność temperatury w kabinie (1 VIII 2021)

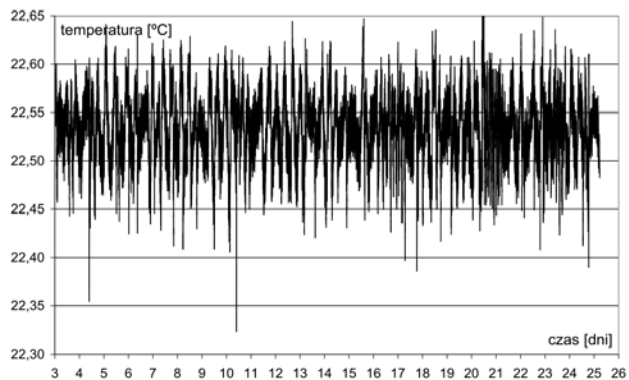
Wpływ na stabilność temperatury w kabinie wywiera w tej porze roku również nasłonecznienie zewnętrznych ścian pomieszczenia światłem odbitym od przeciwległej ściany budynku oraz nasłonecznienie obudowy skraplacza zlokalizowanego na dachu budynku.

Na rysunku 5 przedstawiono tygodniowy przebieg zmian temperatury w kabinie podczas pomiarów w okresie letnim, który potwierdza zakładaną stabilność temperatury wewnątrz kabiny.



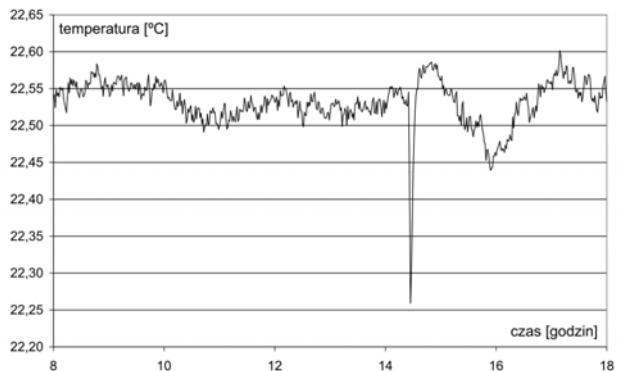
Rys. 5. Tygodniowa stabilność temperatury w kabinie (3-10 VIII 2021)

Na rysunku 6 przedstawiono przebieg temperatury wewnątrz kabiny zarejestrowany w przeciągu około 3 tygodni (od 3 do 25 sierpnia 2018). Przedstawione wahania temperatury oraz maksymalne odchyłki od wartości zadanej są porównywalne z analogicznym okresem zimowym przedstawionym na rysunku 3 (z wyłączeniem zakłócenia spowodowanego przez personel w dniu 15.01).



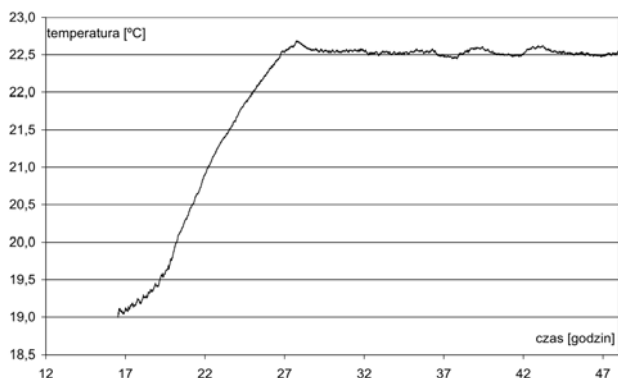
Rys. 6. Kilkutygodniowa stabilność temperatury w kabinie (3-25 VIII 2021)

Podczas rejestrowanej pracy komory odnotowano różnego rodzaju zakłócenia w funkcjonowaniu. Przykładowo na rysunku 7 przedstawiono powiększony przebieg zmian temperatury wewnątrz kabiny przy zakłóceniu w postaci zwiększonej wymiany powietrza spowodowanego otwarciem drzwi kabiny.



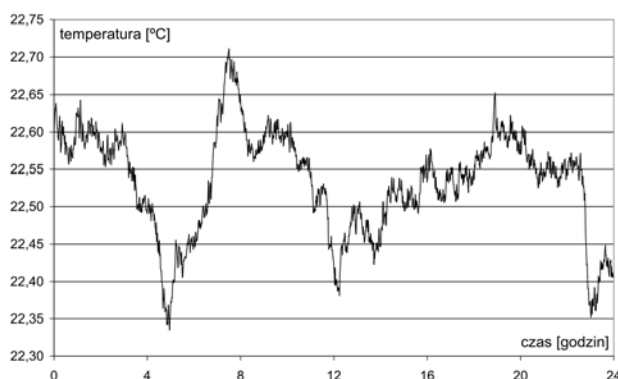
Rys. 7. Dobowa stabilność temperatury w kabinie (22 X 2021)

Tego typu zakłócenie powoduje wzrost temperatury wewnętrznej, korektę położenia zaworu oraz zwiększenie amplitudy wahań temperatury w ciągu 8 - 12 godzin po wystąpieniu zakłócenia. Zjawisko to jest brane pod uwagę przy realizowaniu pomiarów wewnątrz kabiny. Ponieważ proces pomiaru jest zautomatyzowany, w programie sterującym ustawiane jest opóźnienie momentu rozpoczęcia pomiarów względem chwili uruchomienia (startu) programu sterującego. Opóźnienie to jest wymagane również w celu ustabilizowania się temperatury obudów komparowanych wzorców. Proces ten trwa kilka godzin. Poważniejszym problemem jest zakłócenie wywołane przez zanik napięcia zasilającego. O ile zasilanie aparatury pomiarowej jest podtrzymywane przez odpowiedni układ (UPS), to zasilanie systemu stabilizującego temperaturę przestaje funkcjonować po zaniku zasilania. Przywrócenie systemu do prawidłowej pracy nie zawsze jest poprawne, gdyż niekiedy zawieszają się układy zwiększający rozdzielczość pomiaru przez sterownik temperatury w kabinie. Dochodzi wtedy do tak zwanego „przechłodzenia” kabiny. Powrót do normalnej pracy następuje po restarcie układu zwiększający rozdzielczość pomiaru temperatury. Przebieg temperatury ilustrujący opisany problem po zaniku napięcia zasilającego przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Dwudobowa stabilność temperatury w kabinie po jej „przechłodzeniu” (21-22 XI 2019)

Przy porównywaniu wyników uzyskanych w odstępie około 3,5 roku szczególnie uważnie poszukiwano symptomów wskazujących na zużycie eksploatacyjne systemu. Motywacją do tych poszukiwań była nietypowa awaria, która wystąpiła wiosną 2022 roku i polegała na rozszczelnieniu wymiennika płytowego agregatu wody lodowej a w konsekwencji uszkodzeniu silnika sprężarki. Spowodowała ona przejście układu w tryb awaryjny polegający na chłodzeniu systemu wyłącznie przy pomocy obiegu wspomagającego (*free cooling*). Po drobnej korekcie wznowiono pracę układu, uzyskując dobową stabilność temperatury jak na rysunku 9.



Rys. 9. Dobowa stabilność temperatury w kabinie (14 II 2022)

Zadawalająca praca komory została następnie zakłócona przez niezależny od instalacji chłodzącej centralny system ogrzewania budynku. Konsekwencją dostarczania dodatkowego ciepła w warunkach niedoboru mocy chłodzącej były kilkugodzinne stany całkowitego otwarcia zaworu trójdziałnego oznaczające okresowy brak regulacji (nasylenie elementu wykonawczego). Po analizie pracy układu w tym stanie oceniono iż możliwe jest skorygowanie nastaw regulatora i osiągnięcie stabilności temperatury porównywalnej z tą uzyskiwaną przy

funkcjonującym prawidłowo agregacie wody lodowej. Ostatecznie stan ten potraktowano jako awaryjny i dokonano modernizacji systemu. Obecnie realizowany jest proces zbierania danych, gdyż jego właściwości nieco różnią się od tych przed modernizacją.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie badań i doświadczeń, zebranych podczas wieloletniej eksploatacji wynika, iż system stabilizujący temperaturę w laboratorium wzorców AC-DC umożliwia utrzymanie na stanowisku pomiarowym temperatury z błędem zawierającym się w przedziale $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Podana wartość, mierzona za pomocą termometru o małej stałej czasowej, rzędu kilku sekund, reprezentuje błąd graniczny występujący w ciągu doby. Jeżeli zarejestrowane wartości temperatury przedstawić w postaci odchyłek od wartości zadanej, a następnie wyznaczyć gęstość prawdopodobieństwa, to rozszerzona niepewność temperatury w komorze jest równa $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$.

Analiza zebranych danych dostarczyła również wielu cennych informacji o właściwościach systemu stabilizującego temperaturę, które nie zostały ujawnione w trakcie testów uruchomieniowych instalacji. Należą do nich m.in. zdeterminowanie wartości parametrów opisujących dynamikę odpowiedzi systemu na różne zdarzenia, występujące podczas normalnej i zakłóconej pracy, zapotrzebowanie na czynnik chłodzący oraz zmienność tego zapotrzebowania w perspektywie dnia, miesiąca czy roku. Zebrane informacje i doświadczenia ułatwią kontynuowanie prac nad dalszym udoskonalaniem systemu.

Autor: dr inż. Wiesław Domański, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: wieslaw.domanski@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Kampik M., Domański W., Grzenik M., Majchrzak K., Musioł K., Tokarski J., System stabilizacji warunków środowiskowych w Laboratorium Wzorców AC-DC, *PAK*, (2014) nr 2, 73-76
- [2] Klonz M., “AC-DC Transfer Difference of the PTB Multijunction Thermal Converter in the Frequency Range from 10 Hz to 100 kHz,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, IM-36, (1987) No. 2, 320 – 329
- [3] Laiz H., Klonz M., Kessler E., Kampik M., Lapuh R., Low-Frequency AC-DC Voltage Transfer Standards with New High Sensitivity and Low-Power-Coefficient Thin-Film Multijunction Thermal Converters, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 52, (2003), No. 2, 350-354
- [4] Kampik M., Grzenik M., Lippert T., Trinchera B., Comparison of a Planar Thin-Film Thermal AC Voltage Standard up to 1 MHz, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, (2017), No. 6, 1379-1384
- [5] Kampik M., Stanowisko do wzorcowania termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2010), nr 1, 239-244