

ISSN 2080-5632

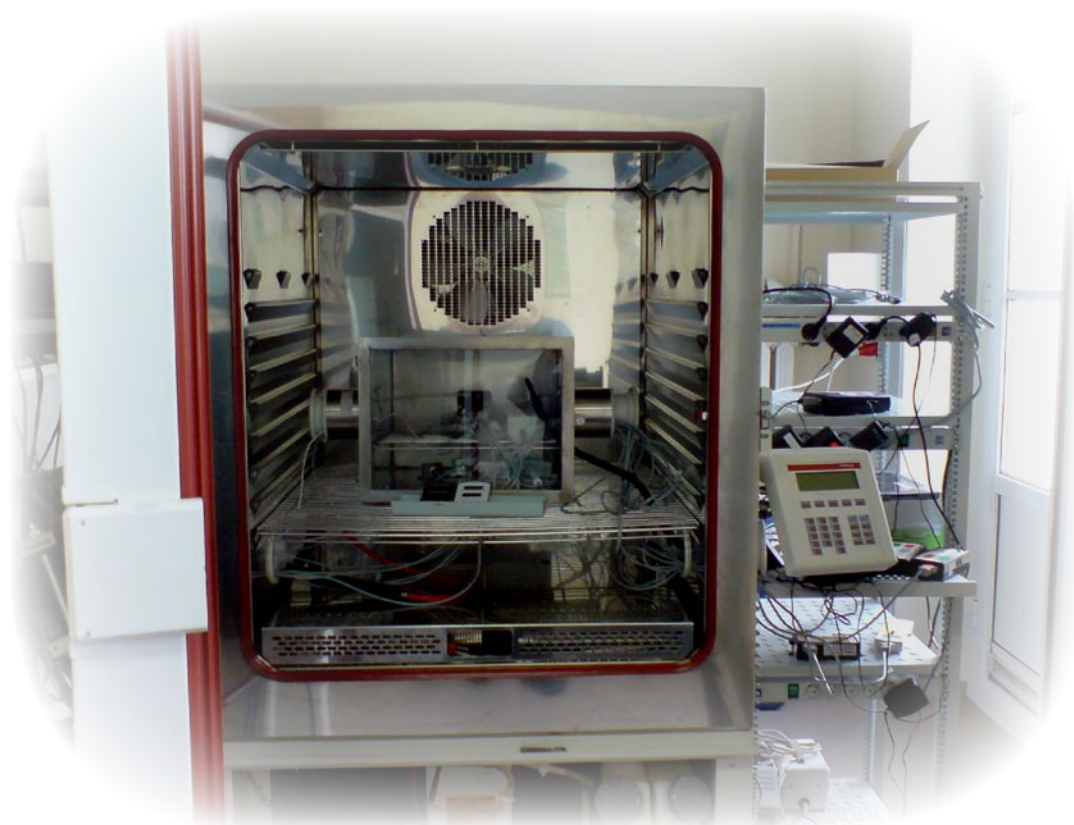


METROLOGIA

Biuletyn Głównego Urzędu Miar

Nr 4(15)

grudzień 2009





*Wszystkim Czytelnikom i Współpracownikom
składamy życzenia
spokojnych i radosnych
Świąt Bożego Narodzenia
oraz pomyślności i sukcesów
w Nowym 2010 Roku*

Redakcja

W bieżącym numerze:

<i>Wilgotność powietrza i gazów. Pomiary i wzorcowanie – K. Flakiewicz ...</i>	3
<i>Badania wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne przyrządów pomiarowych – T. Wąsala</i>	21
<i>Podejścia związane z wyrażaniem niepewności pomiaru – P. Fotowicz ...</i>	31
<i>Informacja o nadaniu stopnia naukowego</i>	34
<i>Informacja o rozprawie doktorskiej – P. Fotowicz</i>	35
<i>Informacja o udziale pracowników Głównego Urzędu Miar i Okręgowych Urzędów Miar w wydarzeniach metrologicznych w roku 2009 – D. Sochocka</i>	38

Na okładce: Wnętrze komory klimatycznej wraz kasetą, stosowaną do wzorcowania termohigrometrów i elektronicznych psychrometrów o wyższej dokładności.

Wilgotność powietrza i gazów

Pomiary i wzorcowanie

Krzysztof Flakiewicz

Główny Urząd Miar – Zakład Fizykochemii

W pracy przedstawiono zarys dziedziny zajmującej się pomiarami wilgotności powietrza i gazów. Dokonano przeglądu zjawisk fizycznych i pojęć stosowanych do opisu wilgotności gazów, zgodnie z aktualnym stanem wiedzy i współczesną praktyką pomiarową. Omówiono różne metody generowania jednostek miary wilgotności, a mianowicie temperatury punktu rosy i wilgotności względnej. Przedstawiono schematycznie budowę i zasadę działania podstawowych wzorców odniesienia (generatorów temperatury punktu rosy oraz wzorca odniesienia wilgotności względnej) opracowanych i stosowanych w Laboratorium Wilgotności GUM. Omówiono metody wzorcowania (przekazywania jednostki wilgotności do wzorców roboczych i przyrządów użytkowych) oraz sposób przedstawiania wyników wzorcowania. Przedyskutowano właściwości metrologiczne różnych typów przyrządów oraz ich przydatność do pomiarów wilgotności w różnych warunkach i zakresach pomiarowych. Podano możliwości pomiarowe Laboratorium Wilgotności GUM z uwzględnieniem udziału Laboratorium w międzynarodowych porównaniach wzorców wilgotności, których wyniki stanowią podstawowe kryterium potwierdzające kompetencje pomiarowe Laboratorium.

Słowa kluczowe: Wilgotność; pomiar wilgotności; wzorce wilgotności; generator wilgotności; temperatura punktu rosy; wilgotność względna; wzorcowanie; spójność pomiarowa.

Humidity of air and gases Measurements and calibration

This paper outlines the subject of measurement of humidity of air and gases. Physical phenomena associated with humidity and the quantities used for description of humidity are briefly reviewed from the viewpoint of the contemporary state of knowledge and the practical aspects of measurements in this area. Different methods of generation of humidity standards are discussed: the method of the dew-point temperature and the relative humidity approach. The principles of operation and design of the primary reference standards (the dew-point generators and the relative humidity standard), which were designed, constructed and are in use in the Humidity Laboratory of the Central Office of Measures (GUM) are briefly discussed. Different methods of calibration are described and the transfer of the unit of humidity to working standards and measuring instruments is discussed. The method of presentation of calibration results is discussed. Evaluation of metrological properties of different measuring instruments is given and their application in different conditions and measuring ranges is discussed. The measurement capability of the Humidity Laboratory is given; it has been confirmed by participation in international comparisons of humidity standards, which confirmed the competence of the Laboratory.

Key words: Humidity; measurement of humidity; humidity standards; humidity generator; dew-point temperature; relative humidity; calibration; traceability.

1. Wstęp

Wilgotność jest pojęciem opisującym zjawisko występowania wody w różnych postaciach w otaczającym nas środowisku. Woda może występować w postaci czystej, w mieszaninie z ciałami stałymi i cieciami, jako składnik roztworów oraz mieszanin parowo-gazowych. Najczęściej spotykaną naturalną mieszaniną parowo-gazową jest oczywiście powietrze. Woda jest wszechobecnym i bardzo aktywnym czynnikiem wpływającym w zasadniczy sposób na stan środowiska naturalnego, na przebieg procesów fizykoche-

micznych w przyrodzie, procesów technologicznych w przemyśle oraz na właściwości substancji naturalnych i produktów przemysłowych.

W celu opisanie tych procesów, konieczne było zdefiniowanie odpowiednich wielkości fizycznych, które w sposób jednoznaczny, ścisły, a jednocześnie funkcjonalny określają ilość wody zawartej w rozmaitych postaciach w fazie czystej i w mieszaninie z innymi mediami, a w szczególności w środowisku naturalnym. Jednocześnie bardzo istotna jest przydatność tak zdefiniowanych wielkości do stosowania w warunkach praktycznych, tak aby można było dokonywać pomiarów wilgotności bez konieczności stosowania złożonych procedur laboratoryjnych.

2. Gaz, para, stan nasycenia

Zarówno powyżej temperatury krytycznej (około 374 °C), jak i w stanie nienasyconym, para wodna zachowuje się jak gaz i jest dobrze opisywana równaniem stanu gazu doskonałego. Po sprężeniu pary do stanu nasycenia może zachodzić jej skraplanie. W tym stanie ciśnienie cząstkowe pary osiąga wartość maksymalną w danej temperaturze; podczas dalszego sprężania nadmiar pary wykrapla się w objętości w postaci mgły lub na elementach stałych jako rosa. Ciśnienie cząstkowe pary pozostaje stałe w miarę sprężania w procesie izotermicznym, choć jest zależne od temperatury oraz, w mniejszym stopniu, od ciśnienia całkowitego. W wyniku kondensacji lub parowania w stanie nasyconym, zmieniają się proporcje masowe pomiędzy poszczególnymi fazami.

W obliczeniach higrometrycznych zasadnicze znaczenie ma zależność ciśnienia nasyconej pary wodnej od temperatury w fazie czystej, nad płaską powierzchnią wody (p_{ws}) lub lodu (p_{is}). Gdy temperatura T jest wyrażona w kelwinach (wg skali temperatur ITS 90), a obliczane ciśnienia cząstkowe są wyrażone w paskalach, zależność ta dla wody ma następującą postać [1]

$$\ln [p_{ws}(T)] = -6096,9385 \cdot T^{-1} + 21,2409642 - 2,711193 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,673952 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2,433502 \cdot \ln T, \quad (1)$$

a dla lodu

$$\ln [p_{is}(T)] = -6024,5282 \cdot T^{-1} + 29,32707 + 1,0613868 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1,3198825 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,49382577 \cdot \ln T. \quad (2)$$

Niepewności rozszerzone, związane z obliczeniami wykonywanymi za pomocą tych równań, są szacowane przy prawdopodobieństwie 0,95 na poniżej 0,01 % wartości obliczonej dla wody w przedziale temperatur (0 ÷ 100) °C; poniżej 0,6 % wartości obliczonej dla wody przechłodzonej w przedziale (-50 ÷ 0) °C; oraz poniżej 1,0 % wartości obliczonej dla lodu w przedziale (-100 ÷ 0) °C [2]. W praktyce można spotkać się ze stosowaniem innych równań [3], które dają bardzo zbliżone wyniki obliczeń.

Jeżeli para wodna występuje w mieszaninie z innymi gazami, to w stanie nasycenia ilość pary wodnej jest większa niż w przypadku fazy czystej. Wzrost ilości pary wodnej w mieszaninie w stanie nasycenia, w stosunku do przypadku fazy czystej, zależy od temperatury, ciśnienia całkowitego oraz rodzaju gazów i jest opisywany przez tzw. współczynnik zwiększenia (*enhancement factor*) $f_i(p, T)$, który w literaturze polskiej jest też określany jako lotność pary wodnej [4].

3. Wielkości stosowane do określania wilgotności

Wilgotność bezwzględna lub wilgotność absolutna (*absolute humidity*), $d = m_v / V$, określa stosunek masy pary wodnej m_v do zajmowanej przez nią objętości V (gęstość pary wodnej). Jest to wielkość prosta pojęciowo, ale trudna do wykorzystania w praktyce pomiarowej.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej, p_v , jest to ciśnienie wywierane przez cząsteczki pary wodnej w stanie nienasyconym lub nasyconym.

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej, p_{vs} , oznacza ciśnienie wywierane przez cząsteczki pary wodnej w stanie nasycenia.

Temperatura punktu rosy (*dew-point temperature*), T_{dp} , jest to temperatura, do której należy schłodzić izobarycznie parę wodną (lub mieszaninę parowo-gazową), aby osiągnęła ona stan nasycenia.

Wilgotność względna oznaczana jest najczęściej symbolem RH (*relative humidity*) i określa ona w procentach stosunek masy pary wodnej zawartej w danej objętości badanego powietrza w znanej temperaturze, do maksymalnej zawartości pary wodnej w powietrzu o tej samej objętości i temperaturze (tzn. do zawartości pary wodnej w stanie nasycenia). Wilgotność względną $RH(T, p)$ najwygodniej jest wyrazić poprzez stosunek ciśnień cząstkowych pary wodnej:

$$RH(T, p) = \frac{p_v(T)}{f(T, p) \cdot p_{vs}(T)} \cdot 100 \% , \quad (3)$$

gdzie $RH(T, p)$ – wilgotność względna w temperaturze T , przy ciśnieniu całkowitym powietrza p ; $p_v(T)$ – aktualne ciśnienie cząstkowe pary wodnej w temperaturze T ; $p_{vs}(T)$ – ciśnienie nasyconej pary wodnej w temperaturze T ; $f(T, p)$ – współczynnik zwiększenia dla nasyconej pary wodnej w powietrzu o temperaturze T i ciśnieniu całkowitym p .

Takie wielkości jak wilgotność bezwzględna, ciśnienie cząstkowe pary wodnej, temperatura punktu rosy oraz wilgotność względna mogą być określane dla pary wodnej występującej zarówno w fazie czystej jak i w mieszaninie parowo-gazowej. Istnieją też wielkości, które z definicji mogą być zastosowane wyłącznie do określania wilgotności mieszanin parowo-gazowych (np. powietrza). Do wielkości tego rodzaju należy zawartość wilgoci, $x = m_v / m_a$, zwana też stosunkiem zmieszania (*mixing ratio*), określająca stosunek masy pary wodnej m_v zawartej w danej objętości powietrza do masy pozostałych (tzw. „suchych”) składników powietrza, m_a . Innym ważnym pojęciem jest zawartość wilgoci (udział pary wodnej) w mieszaninie z powietrzem lub innymi gazami; wielkość ta, zwłaszcza w zakresie niższych wilgotności, jest często wyrażana w jednostkach ppm (*parts per million*). Jednostki ppm wyrażają stosunek objętości cząstkowej zajmowanej przez parę wodną do 10^{-6} objętości cząstkowej zajmowanej przez suchą składową mieszaniny parowo-gazowej, czyli liczbę cząsteczek wody na milion pozostałych cząsteczek mieszaniny parowo-gazowej. Jednostki ppm można również używać do wyrażania stosunku masy pary wodnej w próbce do 10^{-6} masy suchej składowej tej próbki. Dla bardzo suchych gazów stosowane są też jednostki ppb (*parts per billion*, z charakterystycznym czynnikiem 10^{-9} zamiast 10^{-6}). Jednostki te nie są wymienione w rozporządzeniu [5], ale są stosowane w niektórych przyrządach.

Zauważmy, że pewne wielkości, takie jak np. wilgotność bezwzględna, temperatura punktu rosy czy ciśnienie cząstkowe, mają charakter bezwzględny, tzn. podanie wartości tej

wielkości jednoznacznie ją określa. Natomiast inne wielkości, takie jak wilgotność względna czy zawartość wilgoci, są określane odpowiednio względem stanu nasycenia lub ilości innych składników mieszaniny i pełniejsze określenie stanu układu wymaga podania dodatkowych informacji.

4. Metody pomiarowe

Nie wszystkie wymienione wyżej wielkości dają się łatwo i dokładnie zmierzyć. Takie wielkości jak wilgotność bezwzględna i zawartość wilgoci wymagają złożonych procedur laboratoryjnych w celu oddzielenia i zważenia pary wodnej z danej próbki lub oddzielenia i zważenia suchej części mieszaniny parowo-gazowej. Jeszcze pod koniec ubiegłego wieku stosowano takie procedury przy budowie wzorcowych instalacji grawimetrycznych [6, 7, 8, 9]. Z pomiarem ciśnienia cząstkowego są podobne problemy – pomiar jest prosty jedynie w przypadku czystej pary wodnej (ponieważ ciśnienie cząstkowe jest wówczas równe ciśnieniu całkowitemu), ale w przypadku mieszaniny pary wodnej z innymi gazami również pojawia się problem rozdzielania składników. O ile w pomiarach rutynowych ciśnienie cząstkowe nie znalazło większego zastosowania, o tyle w obliczeniach higrometrycznych znajomość ciśnienia cząstkowego pary wodnej nasyconej odgrywa kluczową rolę [1].

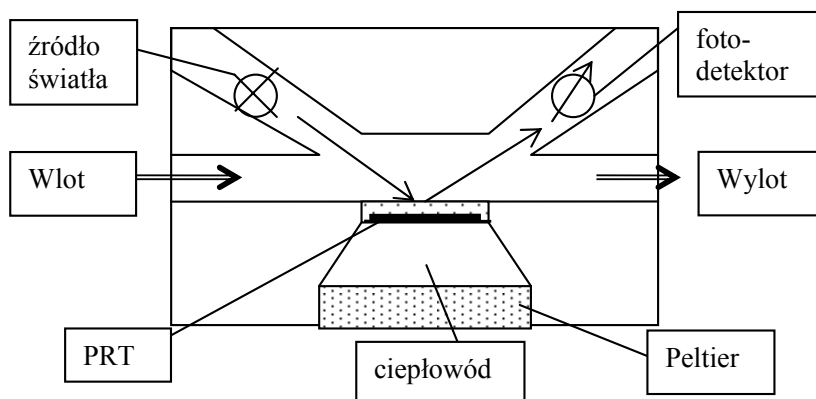
Postęp technologii półprzewodników i elektroniki umożliwił w latach dziewięćdziesiątych budowę na tyle dokładnych i funkcjonalnych higrometrów punktu rosy, że racjonalne stało się oparcie spójności pomiarowej o pomiary temperatury punktu rosy i temperatury powietrza lub innych mieszanin parowo-gazowych. W tym celu opracowano metody wzorcowania i zbudowano liczne stanowiska wzorcowe temperatury punktu rosy; prace takie zostały wykonane również w GUM [10, 11]. Znalazło to odzwierciedlenie w zorganizowaniu przez BIPM, EURAMET i inne regionalne organizacje metrologiczne porównań kluczowych i uzupełniających wzorców temperatury punktu rosy, w których GUM uczestniczy z dużym powodzeniem. W rezultacie możliwe jest powiązanie pomiarów higrometrycznych z dobrze określonym wzorcem temperatury punktu rosy i zagwarantowanie w ten sposób możliwości wykazania się spójnością pomiarową.

W praktyce przemysłowej i laboratoryjnej najczęściej wykonywane są pomiary wilgotności względnej i temperatury punktu rosy. W powiązaniu z równocześnie prowadzonymi pomiarami temperatury i ciśnienia, możliwe są wyliczenia również innych wielkości, których bezpośredni pomiar lub obliczenie byłoby bardzo kłopotliwe, trudne lub wręcz niemożliwe.

4.1 Pomiar temperatury punktu rosy

Temperatura punktu rosy pełni wiodącą rolę w higrometrii. Podstawowa, bezpośrednia metoda pomiaru tej wielkości polega na tym, że pewien obiekt fizyczny (lustro, kryształ kwarcu lub czujnik cienkowarstwowy) jest chłodzony do temperatury, w której pojawia się na nim rosa (lub szron w temperaturach ujemnych). Fakt ten jest rejestrowany optycznie przez pomiar odbicia lub rozproszenia światła na chłodzonym obiekcie. Stosuje się również inne metody, np. pomiar zmiany impedancji obiektu, spowodowanej pojawieniem się rosy lub detekcję skokowej zmiany powierzchniowych drgań akustycznych w punkcie rosy (metoda SAW). Chłodzenie obiektu jest zwykle realizowane za pomocą elementu Peltiera,

a temperatura jest mierzona za pomocą miniaturowego czujnika. Przykład głowicy pomiarowej z chłodzonym lustrem, stosowanej do pomiaru temperatury punktu rosy jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat głowicy pomiarowej urządzenia z chłodzonym lustrem do pomiaru temperatury punktu rosy.

Zasada działania takiego urządzenia jest następująca. Przez czujnik przepływa strumień powietrza, którego wilgotność ma być zmierzona. Na lustro, którego wysokiej jakości powłoka galwaniczna jest często wykonana z metalu szlachetnego (platyna, rod), pada wiązka światła z odpowiednio umieszczonego źródła. Czyste lustro dobrze odbija i słabo rozprasza wiązkę padającego światła; po schłodzeniu lustra do temperatury, w której pojawia się na nim rosa (tzn. do temperatury punktu rosy), następuje skokowe zmniejszenie natężenia wiązki światła odbitego, ponieważ rośnie rozproszenie światła w punkcie odbicia. Zmiany intensywności światła odbitego są rejestrowane przez odpowiednio umieszczony fotodetektor, zaś czujnik temperatury, np. platynowy termometr rezystancyjny (*platinum resistance thermometer*, PRT) mierzy temperaturę graniczną lustra, przy której pojawia się (lub zanika) rosa.

Elektroniczny układ pomiarowo-zasilający urządzenia pomiarowego jest sterowany przez system komputerowy kierujący jego pracą, co umożliwia pomiary temperatury punktu rosy z bardzo małą niepewnością. Jak każdy przyrząd elektroniczny o bardzo dobrej rozdzielczości, powtarzalności, odtwarzalności i stabilności w czasie, wymaga on jeszcze dokładnego wzorcowania, do czego służą wzorce budowane w GUM. W przypadku higrometrów punktu rosy z chłodzonym lustrem, istnieją jeszcze dodatkowe problemy, związane z jednoznacznością interpretacji wyników. Otóż w niezbyt niskich temperaturach, a w praktyce w przedziale $(-50 \div 0)^\circ\text{C}$, na lustrze mogą pojawiać się różne fazy skondensowane, takie jak szron, rosa lub układ wielofazowy. Dlatego, aby uzyskać jednoznaczny wynik pomiaru, konieczne jest odpowiednie doświadczenie w takich pomiarach.

W praktyce stosuje się również higrometry punktu rosy wykorzystujące zjawisko sorpcji pary wodnej na różnych strukturach (tlenki glinu, ceramika). Wykorzystywane są one głównie w pomiarach przemysłowych, gdyż pomiar za pomocą urządzeń tego typu jest względnie szybki; wadą tej metody jest to, iż ma ona charakter pośredni, zaś przyrząd jest bardzo wrażliwy na zanieczyszczenia i wymaga znacznie częstszego wzorcowania.

4.2 Pomiar wilgotności względnej

Jest to najczęściej wykonywany pomiar wilgotności powietrza i jest obok temperatury i ciśnienia trzecim istotnym parametrem, służącym do określania warunków środowiskowych. Poniżej omówione są trzy metody pomiarowe stosowane do pomiaru wilgotności względnej.

4.2.1 Metoda odniesienia (wzorcowa)

Metoda ta polega na jednoczesnym pomiarze temperatury punktu rosy, T_{dp} , i temperatury pary wodnej, T , w powietrzu lub innej mieszaninie parowo-gazowej. Wilgotność względna odniesienia RH wyliczana jest z zależności

$$RH = \frac{P_s(T_{dp})}{P_s(T)} \cdot 100 \% , \quad (4)$$

gdzie $P_s(T_{dp})$ oznacza ciśnienie cząstkowe nasyconej pary wodnej w temperaturze T_{dp} , mierzonej przez wzorcowy higrometr punktu rosy, zaś $P_s(T)$ jest to ciśnienie cząstkowe nasyconej pary wodnej w temperaturze T , mierzonej przez termometr wzorcowy.

4.2.2 Metoda psychrometryczna

Metoda psychrometryczna polega na jednoczesnym pomiarze temperatury termometru suchego, T_s , i wilgotnego, T_w , w przepływającym powietrzu. Termometr suchy mierzy wówczas temperaturę powietrza, a termometr mokry oziębia się aż do ustalenia się pewnej różnicy temperatur, zwanej różnicą psychrometryczną, która zależy głównie od wilgotności powietrza. Wilgotność względna RH może być wyliczona ze wzoru psychrometrycznego

$$RH = \left(1 - \frac{A \cdot P \cdot (T_s - T_w)}{P_{vs}(T_s)} \right) \cdot 100 \% , \quad (5)$$

gdzie A – stała psychrometryczna, której wartość dla psychrometru aspiracyjnego (z wymuszonym przepływem powietrza) zawiera się w przybliżeniu w granicach $(6,4 \div 6,8) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; P – ciśnienie atmosferyczne; $P_{vs}(T_s)$ – ciśnienie pary nasyconej w temperaturze T_s .

Metodę tę stosuje się w zasadzie w temperaturach dodatnich, aczkolwiek może być ona zastosowana, z pewnymi ograniczeniami, również w temperaturach ujemnych. Metoda psychrometryczna ma istotne zalety w przypadku długotrwałych pomiarów wysokich wilgotności względnych ($RH > 90 \%$), gdy metody sorpcyjne w tych warunkach są obciążone problemem kumulacji wody, czyli tzw. „nasiąkaniem” czujników.

4.2.3 Metoda sorpcyjna

W tej metodzie wykorzystuje się zmianę właściwości elektrycznych lub mechanicznych różnych materiałów (głównie organicznych) o konsystencji stałej, wraz ze zmianą ich wilgotności, która zależy z kolei od wilgotności środowiska, w którym są one umieszczone. Dawniej dominowały higrometry mechaniczne (włosowe, membranowe), ale rozwój elektroniki oraz technologii i inżynierii materiałowej umożliwił opracowanie i produkcję tanich cienkowarstwowych impedancyjnych czujników wilgotności względnej, pojemnościowych i rezystancyjnych. Aktywnym elementem czujnika pojemnościowego jest warstwa higo-

skopijnego dielektryka w kondensatorze, zaś czujnik rezystancyjny zawiera higroskopijny materiał przewodzący. Pojemność lub (odpowiednio) rezystancja takich czujników jest skorelowana z wilgotnością otaczającego powietrza wskutek sorpcji i desorpcji cząsteczek pary wodnej w jego warstwie higroskopijnej, która ma porowatą strukturę, umożliwiającą wnikanie cząsteczek wody.

Najbardziej rozpowszechnione cienkowarstwowe czujniki pojemnościowe mają postać cienkiego kondensatora, w którym elementem czułym na wilgoć jest warstwa dielektryka (najczęściej poliamidu). Jedna z elektrod jest tak cienka, że para wodna z łatwością przez nią przenika i jest sorbowana w dielektryku. Pojemność elektryczna takiego czujnika wynosi przeważnie około kilkuset pikofaradów i pod wpływem wilgotności może zmieniać się w granicach około (20 ÷ 30) %. Czujniki pojemnościowe wymagają indywidualnej kalibracji, powtarzanej okresowo ze względu na procesy starzenia materiału i wpływ zanieczyszczeń kumulujących się podczas dłuższej eksploatacji, szczególnie w środowisku o wysokim stopniu zanieczyszczenia, co objawia się zawyżaniem wskazań przyrządu, zwłaszcza przy wyższych wilgotnościach.

Charakter sorpcji decyduje o właściwościach czujników. Ponieważ sorpcja jest procesem o zróżnicowanej naturze fizykochemicznej i wykazuje wyraźną histerezę, to przyrządy z czujnikami sorpcyjnymi wykazują również podobne właściwości (histerezę wskazań). Z praktyki pomiarowej wynika, iż istotną właściwością czujników sorpcyjnych jest zależność charakterystyki od historii pomiarów, która przejawia się szczególnie wyraźnie wówczas, gdy pomiary obejmują zakres wyższych wilgotności, a zwłaszcza powyżej 90 % RH. Bardzo istotny jest również czas trwania pomiarów w wysokiej wilgotności, gdyż przy dłuższym kontakcie ze środowiskiem o dużej wilgotności następuje „nasiąkanie” czujnika, wskutek czego jego wskazania długo nie mogą ustabilizować się i płyną w kierunku rosnących wilgotności. Zjawisko to można w przybliżeniu wytłumaczyć zmianą charakteru sorpcji z powierzchniowej (na powierzchniach porowatej struktury tworzywa) na objętościową (wypełnianie porów w całej objętości). Taki „nasączony” czujnik potrzebuje dłuższego czasu na oddanie zgromadzonej wody i jego wskazania są długo zawyżone – może to być kwestia kilku godzin, a nawet paru dni.

5. Metody wzorcowania i generatory

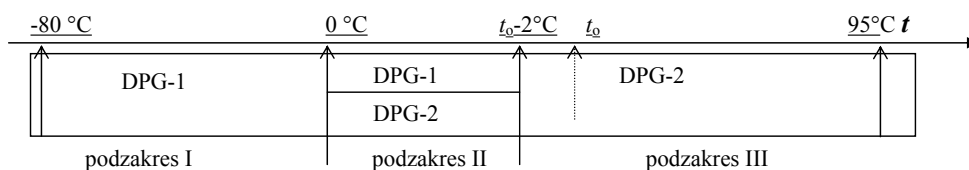
Pomiary temperatury i wilgotności są ze sobą silnie powiązane i w praktyce są wykonywane jednocześnie. W celu wywzorcowania przyrządu do pomiaru wilgotności trzeba wytworzyć powietrze (lub odpowiednią mieszaninę parowo-gazową) o określonej temperaturze, wilgotności i ciśnieniu. Do tego celu służą urządzenia zwane generatorami. Ze względu na zasadę działania i przeznaczenie można wyróżnić następujące typy generatorów:

- Generatory temperatury punktu rosy, stosowane w Laboratorium Wilgotności GUM jako wzorce podstawowe (odniesienia) jednostki miary wilgotności powietrza. Są one przeznaczone do wzorcowania wzorcowych higrometrów punktu rosy, zarówno własnych, jak i stosowanych przez akredytowane laboratoria wzorcujące;
- Generatory dwustrumieniowe (z mieszaniem strumieni suchego i wilgotnego gazu), które stosuje się do wzorcowania użytkowych higrometrów punktu rosy metodą porównania wskazań z higrometrem wzorcowym;
- Generatory dwuciśnieniowe, które są stosowane jako wzorce wilgotności względnej;

- Generatory dwutemperaturowe, które są również stosowane jako wzorce wilgotności względnej;
- Komory klimatyczne, w których – najogólniej mówiąc – realizowane są funkcje grzania i chłodzenia oraz suszenia i nawilżania.
Budowę i działanie niektórych rodzajów generatorów warto omówić bardziej szczegółowo.

5.1 Generatory temperatury punktu rosy

Urządzenia takie służą do wytwarzania strumienia powietrza o dokładnie określonej temperaturze punktu rosy. Zasadniczym elementem generatora tego typu jest precyzyjnie termostatyzowany saturator (nawilżacz), w którym strumień powietrza jest nawilżany parą wodną do stanu nasycenia w znanej temperaturze odniesienia, T_{ref} , która w tych warunkach odpowiada temperaturze punktu rosy, T_{dp} . Tak nawilżony strumień powietrza przesyłany jest dalej, do wzorcowanego higrometru punktu rosy. Temperatura toru przesyłu powietrza nie może być niższa od temperatury punktu rosy strumienia, gdyż wówczas pojawiłyby się w przewodzie wykroplenia, zmieniające w sposób niekontrolowany wilgotność przesyłanego powietrza. Dlatego też, dla temperatur punktu rosy bliskich lub wyższych od temperatury otoczenia, t_o , tor przepływu strumienia powietrza (przewody, złącza, głowica pomiarowa), na odcinku od saturatora do miejsca detekcji w higrometrze, musi być podgrzewany do temperatury wyższej o przynajmniej $(2 \div 10) ^\circ\text{C}$ od mierzonej temperatury T_{dp} . Po dokonaniu pomiaru, strumień powietrza można oziębic i nadmiar pary wodnej skroplic w specjalnym osadniku, aby uniknąć niepożądanego kondensacji pary wodnej w pomocniczych urządzeniach higrometru, takich jak pompka czy przepływomierz. W Laboratorium Wilgotności GUM zostały zaprojektowane i wykonane dwie wersje generatorów temperatury punktu rosy, DPG-1 i DPG-2, których obsługa jest opisana w instrukcji wzorcowania [12], a zakresy pomiarowe są pokazane na rys. 2. Budowę i działanie obu tych generatorów omówiono poniżej.

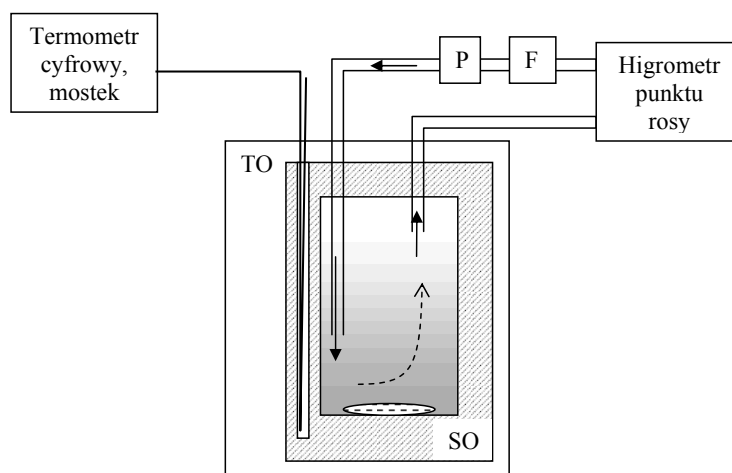


Rys. 2. Zakresy pomiarowe wzorcowych generatorów temperatury punktu rosy w GUM.

5.1.1 Generator temperatury punktu rosy DPG-1

W przypadku temperatur punktu rosy niższych od temperatury otoczenia, generator ten może działać w układzie zamkniętym, ponieważ wielokrotny, cykliczny przepływ strumienia powietrza przez saturator, nad nawet niewielką ilością wody, gwarantuje osiągnięcie stanu nasycenia w temperaturze termostatu. Para wodna wykrapla się w najchłodniejszym miejscu – w praktyce jest to dno saturatora odniesienia. Wynika to z konstrukcji termostatu i jego parametrów technicznych, ale w przypadku grubych ścianek saturatora odniesienia różnice temperatur w jego obrębie są poniżej 1 mK, a więc całkowicie do pominięcia, i tem-

peratura mierzona w kanale znajdującym się wewnątrz bocznej ścianki saturatora jest bardzo dobrym reprezentantem temperatury odniesienia.

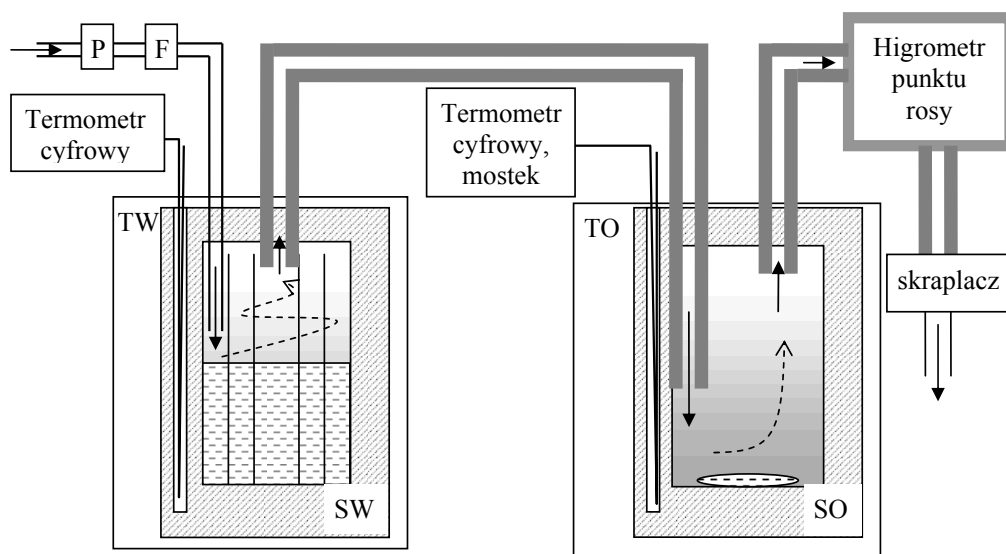


Rys. 3. Schemat generatora temperatury punktu rosy DPG-1. Symbol SO oznacza saturator odniesienia, TO – termostat odniesienia, P – pompkę powietrza, a F – przepływomierz powietrza.

5.1.2 Generator temperatury punktu rosy DPG-2

Gdy temperatura punktu rosy jest wyższa od temperatury otoczenia, pojawia się problem utrzymywania temperatury przewodów, złączy, głowicy higrometru, pompki i przepływomierza w temperaturze wyższej od temperatury punktu rosy. O ile niektóre modele higrometrów mają podgrzewane głowice pomiarowe, a komercyjnie wykonane przewody podgrzewane są dostępne na rynku, o tyle nie spotyka się podgrzewanych pompki i przepływomierzy o odpowiedniej konstrukcji. Stosowane są natomiast skraplacze, które osuszają strumień powietrza po przejściu przez głowicę higrometru. W związku z tym, bardziej funkcjonalne jest zastosowanie generatora działającego w układzie otwartym, z dwustopniowym systemem nawilżania strumienia powietrza. Pompka i przepływomierz mogą być zastosowane na wlocie lub na wylocie generatora. Ponadto, zamiast pompki można zastosować wymuszanie przepływu powietrza za pomocą butli ze sprężonym powietrzem lub odpowiedniego kompresora.

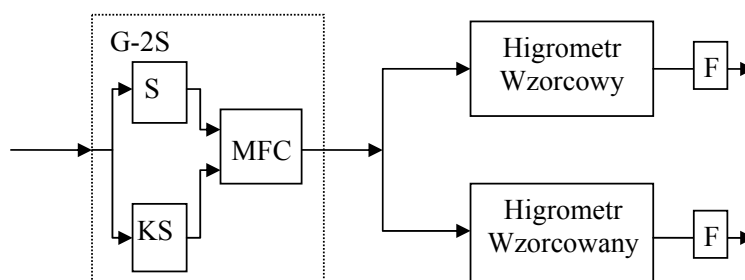
Działanie generatora DPG-2, pokazanego na rys. 4, jest następujące. Powietrze płynie przez przepływomierz i przechodzi do saturatora wstępnego, SW, podgrzanego do temperatury T_w , wyższej o kilka stopni od zakładanej temperatury punktu rosy (T_{ref}) i nawilża się do temperatury punktu rosy, $T_w > T_{dpw} > T_{ref}$. Następnie przepływa przez podgrzewane przewody (gruba linia) do saturatora odniesienia, SO, w którym nadmiar pary wodnej wykrapla się i temperatura punktu rosy strumienia powietrza (T_{dpw}) obniża się do temperatury saturatora odniesienia, T_{ref} . Dalej strumień powietrza płynie podgrzewanymi przewodami do podgrzewanej głowicy pomiarowej higrometru. Po dokonaniu pomiaru temperatury punktu rosy, powietrze przepływa do skraplacza, gdzie schładza się, nadmiar pary wodnej jest wykraplały i usuwany, a osuszone powietrze wypływa na zewnątrz swobodnie, lub może, w miarę potrzeby, przepłynąć przez pompkę czy przepływomierz. Te dwa dodatkowe elementy mogą być usytuowane na początku lub na końcu generatora, zależnie od potrzeb i warunków stosowania wzorcowanego higrometru.



Rys. 4. Schemat generatora temperatury punktu rosy DPG-2. Symbol TW oznacza termostat wstępny, SW – saturator wstępny, TO – termostat odniesienia, SO – saturator odniesienia, P – pompkę gazową, a F – przepływomierz powietrza.

5.1.3 Wzorcowanie higrometru przez porównanie z higrometrem wzorcowym

Metoda ta jest stosowana głównie przy wzorcowaniu higrometrów użytkowych w zakresie temperatur punktu rosy niższych od temperatury otoczenia, rys. 5. Do zasilania układu pomiarowego wykorzystywany jest generator dwustrumieniowy, w którym określoną wilgotność strumienia powietrza uzyskuje się poprzez zmieszanie w odpowiednich proporcjach strumieni suchego i wilgotnego powietrza.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego do wzorcowania higrometrów przez porównanie z higrometrem wzorcowym. Oznaczenie G-2S symbolizuje generator dwustrumieniowy, S – nawilżacz, KS – kolumnę suszącą, MFC – zespół masowych regulatorów przepływu, a F – przepływomierz.

Strumień powietrza dzieli się na dwie równe strugi, które przepływają przez obydwa higrometry połączone w układzie równoległym. Przepływomierze F na wyjściu higrometrów służą do kontroli i regulacji przepływu powietrza przez każdy z higrometrów i utrzymania różnicy ciśnień między higrometrami na optymalnym poziomie, gdyż z uwagi na pewne różnice konstrukcyjne nie zawsze jest możliwe zapewnienie pełnej symetrii w obydwu gałęziach układu przepływu powietrza.

5.2 Wyniki wzorcowania higrometrów punktu rosy

Higrometry są stosowane do pomiarów wilgotności w różnych zakresach pomiarowych, toteż optymalne jest (z punktu widzenia efektywności kosztowej) wywzorcowanie danego przyrządu tylko w takim zakresie pomiarowym, w jakim będzie on rzeczywiście wykorzystywany.

Higrometr wzorcuje się w wybranych punktach, a dla każdego punktu pomiarowego określa się poprawkę

$$\Delta T_{dp} = T_{ref} - T_{dp}, \quad (6)$$

gdzie T_{dp} oznacza wskazanie higrometru wzorcowanego (estymata wartości wskazywanej), zaś T_{ref} symbolizuje wartość odniesienia temperatury punktu rosy (estymatę wartości poprawnej), która obliczana jest ze wzoru

$$T_{ref} = T_s + \Delta T_s + \Delta T_p, \quad (7)$$

gdzie T_s – wskazanie termometru wzorcowego (temperatura saturatora odniesienia) lub higrometru wzorcowego; ΔT_s – poprawka dla wskazań termometru wzorcowego (lub higrometru wzorcowego), określana przy jego kalibracji; ΔT_p – poprawka na różnicę ciśnień pomiędzy saturatorem odniesienia lub głowicą higrometru wzorcowego i głowicą pomiarową. Wartość poprawki ΔT_p wyraża się zależnością

$$\Delta T_p = \left(\frac{p_s(T_{ref})}{b_0} \cdot \frac{\partial T_{ref}}{\partial p_s} \right) \cdot \Delta p, \quad (8)$$

gdzie $p_s(T_{ref})$ – ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej w temperaturze T_{ref} ; b_0 – ciśnienie w saturatorze odniesienia (w tym kontekście jest to w przybliżeniu ciśnienie atmosferyczne); $\partial T_{ref} / \partial p_s$ – nachylenie krzywej zależności temperatury punktu rosy w funkcji ciśnienia cząstkowego pary wodnej nasyconej w temperaturze T_{ref} ; zaś Δp – różnica ciśnień pomiędzy głowicą pomiarową sprawdzanego higrometru i saturatorem lub głowicą pomiarową higrometru wzorcowego.

Po uwzględnieniu powyższych zależności poprawka jest określona wyrażeniem

$$\Delta T_{dp} = T_s + \Delta T_s + \Delta T_p - T_{dp} \quad (9)$$

Ciśnienie cząstkowe p_s oraz odpowiednie pochodne cząstkowe są obliczane z równania (1) dla wody lub (2) dla lodu.

Kwestia wyboru przedziału wzorcowania i ilość punktów pomiarowych jest związana z pracochłonnością wzorcowania i wynikającymi stąd kosztami. Racjonalnym rozwiązaniem jest wybór takiej ilości punktów pomiarowych, które umożliwią wywzorcowanie przyrządu w takim zakresie pomiarowym, który zaspokoi potrzeby użytkownika przy akceptowalnych kosztach. W wyniku wzorcowania określone są poprawki w punktach pomiarowych uzgodnionych z klientem oraz określone są niepewności. Dla wartości leżących pomiędzy punktami wzorcowania, wyniki mogą być interpolowane przy pomocy funkcji liniowej lub wielomianu wyższego rzędu, o ile charakter zależności i potrzeby użytkownika to uzasadniają. Interpolacja zwiększa, co prawda, niepewność wzorcowania, ale w stopniu uzasadnionym względami ekonomicznymi i technicznymi. Ponadto, w przypadku niskich

wilgotności, gdy do wartości poprawnej dochodzimy asymptotycznie, istotnym parametrem wzorcowania jest czas, po którym dokonywane były odczyty. Możliwe jest także wykonanie badań charakterystyk badanego przyrządu, ale jest to podejście znacznie różniące się od zwykłego wzorcowania i koszty takiego przedsięwzięcia mogłyby być niewspółmierne do przydatności uzyskanych informacji. Dlatego też określenie zakresu badań metrologicznych i wzorcowań danego przyrządu wymaga uwzględnienia zarówno racji technicznych jak i ekonomicznych.

Zakresy pomiarowe i najlepsze możliwości pomiarowe osiągnięte w Laboratorium Wilgotności GUM dla metody temperatury punktu rosy przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1. Zakres pomiarowy oraz najlepsze możliwości pomiarowe w poszczególnych podzakresach osiągnięte w Laboratorium Wilgotności GUM. Najlepsza możliwość pomiarowa jest rozumiana jako niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95 %.

Wielkość fizyczna	Rodzaj przyrządów pomiarowych	Zakres pomiarowy	Najlepsza możliwość pomiarowa
Temperatura punktu rosy	Higrometry punktu rosy	(-80 ÷ +90) °C w podzakresach: (-80 ÷ -50) °C (-50 ÷ +50) °C (+50 ÷ +90) °C	(0,3 ÷ 0,1) °C (0,1 ÷ 0,03) °C (0,03 ÷ 0,1) °C

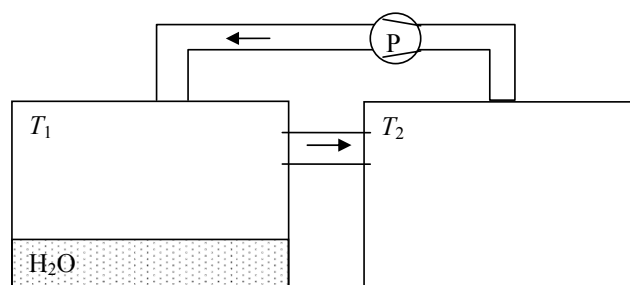
Potwierdzanie zakresów i możliwości pomiarowych jest realizowane poprzez udział Laboratorium Wilgotności w porównaniach kluczowych i uzupełniających, organizowanych przez BIPM (Bureau International des Poids et Mesures, czyli Międzynarodowe Biuro Miar) oraz EURAMET (European Association of National Metrology Institutes, czyli Europejskie Stowarzyszenie Krajowych Instytutów Metrologicznych, dawniej EUROMET). W ostatnich latach Laboratorium wzięło udział w następujących porównaniach: EUROMET P-511 „Porównania generatorów wilgotności”; EUROMET P-717 „Porównania temperatury punktu rosy (zakres wysoki)”; oraz KC EUROMET.T-K6 (EUROMET P-621) „Porównanie realizacji lokalnych skal temperatury punktu rosy/szronu w zakresie od -50 °C do + 20 °C”, które zakończyły się powodzeniem, wykazując wysoki poziom kompetencji metrologicznych Laboratorium Wilgotności GUM.

5.3 Wilgotność względna

Inną wielkością określającą zawartość pary wodnej w powietrzu (lub innym gazie) jest wilgotność względna. Zależy ona, jak to wynika z równań (3) i (4), od temperatury oraz od ciśnienia całkowitego. Ponieważ nie ma metody absolutnej określającej wartości odniesienia dla tej wielkości, konieczne jest stosowanie metody pośredniej, przedstawionej w punkcie 4.2.1. W praktyce, metoda ta jest wykorzystywana w laboratoriach wzorcujących nawet w przypadku wzorcowania termohigrometrów w generatorach dwuciśnieniowych czy dwutemperaturowych, które z definicji są wzorcami wilgotności względnej. Przyczyną tak powszechnego wykorzystania tej metody jest jej duża dokładność, szeroki zakres zastosowania i możliwość dobrej kontroli zapewniającej wiarygodność pomiarów.

5.3.1 Generator dwutemperaturowy

Jest to urządzenie działające w układzie zamkniętym na zasadzie pełnego nawilżania powietrza w temperaturze T_1 w komorze nawilżającej (saturatorze), połączonej z komorą sprawdzania, w której utrzymywana jest temperatura T_2 . W rzeczywistości, w układzie tym mogą występować pewne niejednorodności termodynamiczne. W praktyce, jako T_1 należy przyjąć temperaturę wody w saturatorze, natomiast jako T_2 bierzemy temperaturę powietrza w komorze sprawdzania, mierzoną jak najbliżej wzorcowanego czujnika. Wymuszanie cyrkulacji gazu przez pompkę P nie powinno być zbyt intensywne, aby nie zakłócać quasi-statycznego, izobarycznego charakteru procesu. Schemat generatora dwutemperaturowego jest przedstawiony na rys. 6.



Rys. 6. Schemat generatora dwutemperaturowego.

Z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że wilgotność względna w komorze sprawdzania wynosi

$$RH = [p_{vs}(T_1) / p_{vs}(T_2)] \cdot 100 \% , \quad (10)$$

czyli jest równa stosunkowi ciśnień cząstkowych nasyconej pary wodnej w temperaturach T_1 i T_2 pomnożonemu przez 100 %. Znając temperatury w obu komorach można obliczyć oba ciśnienia cząstkowe, korzystając z równań (1) lub (2), a następnie wilgotność względną.

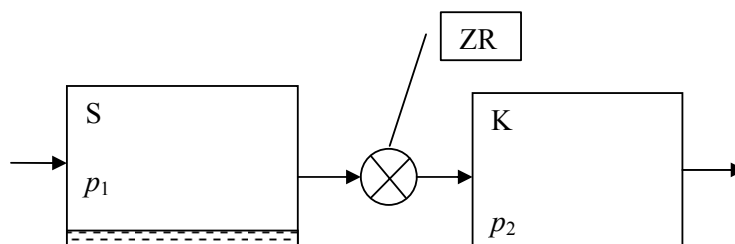
5.3.2 Generator dwuciśnieniowy

Generator dwuciśnieniowy jest przepływowym generatorem wzorcowym wilgotności względnej. Działa on na zasadzie nawilżania w saturatorze strumienia powietrza do stanu nasycenia przy wyższym ciśnieniu p_1 , a następnie rozprężania go do niższego ciśnienia roboczego w komorze sprawdzania p_2 . Proces ten powinien odbywać się izotermicznie. Schemat działania takiego generatora przedstawia rys. 7, na którym kierunek przepływu strumienia powietrza wskazują strzałki.

Wilgotność względną, wytworzoną w komorze sprawdzania tego generatora, można wyliczyć z zależności:

$$RH = \frac{f_s(T, p_1)}{f_s(T, p_2)} \cdot \frac{p_2}{p_1} \cdot 100 \% . \quad (11)$$

W pierwszym przybliżeniu, wilgotność względna jest określona przez stosunek ciśnień, p_2 / p_1 . Uwzględnienie współczynników zwiększenia, $f(T, p)$, zwiększa nieco obliczone wartości RH. Przykładowo, w temperaturze 20 °C poprawka ta daje wzrost o ok. 0,26 % przy RH = 10 % i ok. 0,15 % przy RH = 50 %.

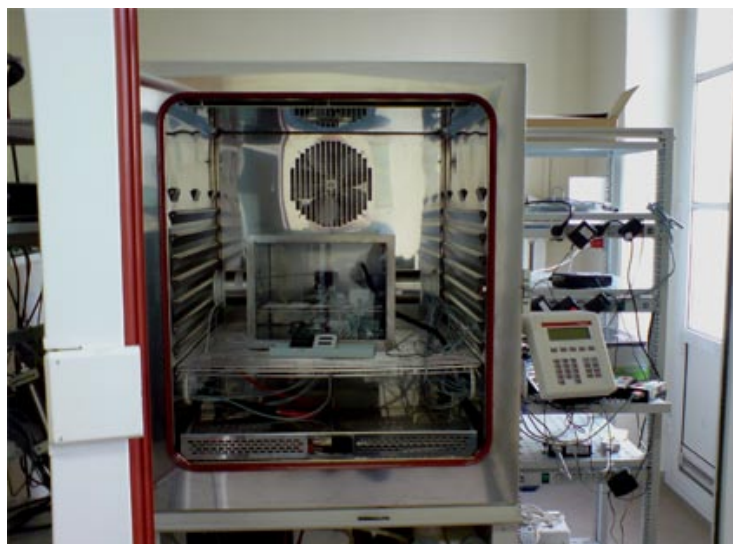


Rys. 7. Schemat generatora dwuciśnieniowego. Symbol S oznacza saturator, ZR – zawór rozprężny, zaś K – komorę sprawdzania.

W praktyce laboratoryjnej niezmiernie ważne jest uzyskanie pełnego lub powtarzalnego nasycenia w saturatorze oraz utrzymanie izotermicznego charakteru procesu. Natomiast obliczenia, łącznie z wyliczeniem poprawek, są w większości przypadków proste i wystarczająco dokładne. Poważnym ograniczeniem w stosowaniu generatorów *RH* jest to, że nie można ich wykorzystać do badania czujników aktywnych, tzn. wytwarzających ciepło, wilgoć lub przepływy, które generują zakłócenia wpływające na wynik pomiaru. Takimi czujnikami są np. psychrometry lub podgrzewane czujniki z LiCl.

5.3.3 Komora klimatyczna i jej zastosowania

Z powodu ograniczeń, jakim podlega stosowanie generatorów wilgotności względnej, bardzo często lepiej jest wykonywać wzorcowanie przyrządów do pomiaru wilgotności względnej z wykorzystaniem komór klimatycznych. Komora klimatyczna służy do wytwarzania powietrza o określonej wilgotności i temperaturze, a wartości odniesienia obliczane są z pomiarów temperatury punktu rosy i temperatury powietrza, jak to opisano w rozdziale 4.2.1.



Rys. 8. Wnętrze komory klimatycznej wraz kasetą, stosowaną do wzorcowania termohigrometrów i elektronicznych psychrometrów o wyższej dokładności, z niepewnością rozszerzoną wartości odniesienia dla wilgotności względnej poniżej 1 % *RH* oraz 0,1 °C dla temperatury.

W komorze występują strugi powietrza o różnej temperaturze i wilgotności, gdyż wewnątrz są elementy o różnej temperaturze (grzałka, parownik i nawilżacz), a powietrze przepływające przez te elementy nie zdąży się wystarczająco wymieszać. Powodowałoby to

dość dużą niepewność wzorcowania, z uwagi na znaczny zakres zmienności temperatury i wilgotności. Wykonanie niewielkich prac adaptacyjnych pozwoliło na uzyskanie takich parametrów metrologicznych komory, które umożliwiły wykorzystanie jej do zbudowania wzorca odniesienia wilgotności względnej.

Przykład takiej adaptacji przedstawiono na rys. 8. Modernizacja komory polegała na wykonaniu specjalnej kasety wyposażonej we własny wentylator, która jest umieszczana wewnątrz komory klimatycznej. Wewnątrz tej kasety istnieją bardziej jednorodne warunki, tzn. temperatura i wilgotność, niż w samej komorze. Kaseca nie jest szczelnie zamknięta, co umożliwia wymianę powietrza z resztą komory, a wewnętrzne mieszanie wyrównuje wilgotność i temperaturę w kasecie, co jest warunkiem koniecznym do wykonywania dokładniejszych pomiarów. O ile w samej komorze, w zależności od miejsca i nastaw komory, rozrzut temperatury może przekraczać nawet 1 °C, a niejednorodność wilgotności względnej może wynosić ok. 2 %, to wewnątrz kasety te rozrzuty są o rząd wielkości mniejsze i wynoszą odpowiednio 0,1 °C i 0,2 %. W centralnej strefie komory, przed kasetą, także można wzorcować przyrządy, ale o mniejszej dokładności, zwłaszcza gdy ich rozdzielczości wskazań wynoszą odpowiednio 1 °C i 1 %.

Na takim właśnie stanowisku, znajdującym się w Laboratorium Wilgotności GUM, wzorcowane są przyrządy do pomiaru wilgotności względnej i temperatury powietrza. Na stanowisku tym można wzorcować jednocześnie kilka przyrządów, jeżeli możliwe jest wykluczenie wzajemnych zakłóceń. W przypadku wilgotności względnej, zakres pomiarowy i najlepsze możliwości pomiarowe zależą od temperatury wzorcowania. Zakresy pomiarowe i najlepsze możliwości pomiarowe uzyskiwane w Laboratorium Wilgotności GUM dla temperatury i wilgotności względnej powietrza są przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Zakresy pomiarowe dla temperatury i wilgotności względnej oraz najlepsze możliwości pomiarowe w poszczególnych zakresach uzyskiwane w Laboratorium Wilgotności GUM. Najlepsza możliwość pomiarowa jest rozumiana jako niepewność rozszerzona przy poziomie ufności 95 %. W przypadku wilgotności względnej, najlepsza możliwość pomiarowa jest podawana w procentach wartości zmierzonej *RH*.

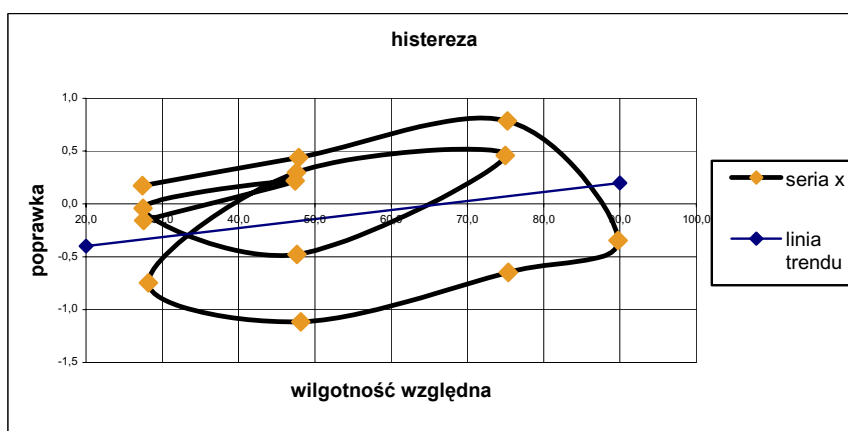
Wielkość fizyczna	Rodzaje przyrządów pomiarowych	Zakres pomiarowy	Najlepsza możliwość pomiarowa	Uwagi
Temperatura powietrza	Termometry elektroniczne, mierniki mikroklimatu	(-40 ÷ +90) °C	(0,1) °C	Wzorcowanie w przedziale temperatur (-40 ÷ +90) °C
Wilgotność względna	Higrometry, termohigrometry, mierniki mikroklimatu oraz psychrometry elektroniczne (dla $t > 0^{\circ}\text{C}$)	(10 ÷ 98) % (10 ÷ 98) % (10 ÷ 98) % (50 ÷ 98) % (80 ÷ 98) %	(0,3 ÷ 0,7) % (0,3 ÷ 0,7) % (0,3 ÷ 0,7) % (0,5 ÷ 1,0) % (1,0 ÷ 1,1) %	przy $t = 90^{\circ}\text{C}$ przy $t = 23^{\circ}\text{C}$ przy $t = 0^{\circ}\text{C}$ przy $t = -20^{\circ}\text{C}$ przy $t = -40^{\circ}\text{C}$

5.4 Przyrządy pomiarowe użytkowe

Wybór przyrządu pomiarowego zależy od zakresu pomiarowego, żądanej dokładności wskazań, szybkości reakcji na zmiany wielkości mierzonej, odporności na obecność zanieczyszczeń oraz od wielu innych parametrów istotnych w warunkach użytkowania. Poniżej omówione są poszczególne typy przyrządów pomiarowych badanych w Laboratorium Wilgotności GUM.

5.4.1 Higrometry i termohigrometry

W pomiarach środowiskowych najczęściej wykorzystywane są higrometry i termohigrometry z impedancyjnymi sorpcyjnymi czujnikami cienkowarstwowymi – pojemnościowymi lub rezystancyjnymi. Są to w większości dobrze dopracowane technologicznie, miniaturowe czujniki nie zakłócające warunków otoczenia. Nie wymagają one specjalnej obsługi, ale należy je chronić przed zanieczyszczeniami. Reagują szybko, ale wykazują zjawisko histerezy, które jest zilustrowane na rys. 9. Poprawka zależy zarówno od kierunku pomiaru jak i od zakresu wielkości mierzonej [13].



Rys. 9. Przykład zależności wskazań higrometru od historii pomiaru.

Przy dokładniejszych pomiarach można oddzielnie uwzględnić historię pomiaru dla każdego punktu. To podejście możemy zastosować wtedy, gdy mamy możliwość wyboru wartości temperatury i wilgotności, jak to ma zazwyczaj miejsce w procesie wzorcowania. W mniej dokładnych pomiarach przemysłowych, a takich jest większość, zazwyczaj nie mamy możliwości wyboru sekwencji zmian temperatury i wilgotności. Korzystniejsze jest wtedy oszacowanie poprawek na podstawie linii trendu (wyznaczonej np. graficznie) oraz uwzględnienie tego efektu jako składowej niepewności, oszacowanej na podstawie przedziału zmienności, przyjmując np. założenie jednostajnego rozkładu poprawek wokół linii trendu. W tym celu wzorcowanie jest wykonywane dwukrotnie w środku przedziału wilgotności względnej, zarówno dla wartości rosnących jak i malejących. Na podstawie tych dwóch pomiarów można oszacować szerokość przedziału zmienności oraz składową histeresową poprawki i niepewności. Ostateczny wynik wzorcowania zależy wówczas od założonego zakresu wzorcowania, wynikającego z docelowego zakresu pomiarowego, w którym przyrząd ma być stosowany.

Istotny wpływ na charakterystyki czujników wilgotności względnej ma temperatura pracy. We współczesnych przyrządach problem uwzględnienia nieliniowości, korekty temperaturowej czy adiacji charakterystyk jest skutecznie rozwiązywany dzięki wykorzystaniu mikroprocesorów.

5.4.2 Psychrometry elektroniczne

Ta kategoria przyrządów pomiarowych, podobnie jak wiele innych przyrządów elektronicznych, ma swoje niepodważalne zalety, a ich stosowanie jest szczególnie korzyst-

ne w zakresie wyższych wilgotności. Przyrządy te wymagają nieco większej staranności obsługi (czystość i efektywność układu zwilżania), ale nie są wrażliwe na kumulację wody i praktycznie nie wykazują histerezy. Charakterystyka psychrometrów elektronicznych jest opisana za pomocą wzoru psychrometrycznego z dokładnością wystarczającą dla większości zastosowań. Przy prowadzeniu pomiarów należy jednak pamiętać o tym, że psychrometr jest przyrządem aktywnym, który wytwarza strumień powietrza i nawilża go. Konieczna jest więc ocena wpływu psychrometru na otoczenie, w którym pracuje, ponieważ w niewielkich układach termodynamicznych może on powodować wzrost wilgotności i temperatury.

Psychrometry, zwłaszcza elektroniczne, posiadają istotne walory, dzięki którym są one w pełni doceniane i wykorzystywane w praktyce przemysłowej. Są one szczególnie użyteczne w sytuacji, gdy trzeba prowadzić długotrwałe pomiary w wysokiej wilgotności. W takich warunkach, najbardziej rozpowszechnione termohigrometry pojemnościowe wykazują istotne wady: nasiakają wodą, wskutek czego zawyżają wskazania wilgotności, pogarsza się ich czułość i dokładność pomiarów. W takich warunkach fizycznych psychrometry sprawują się znacznie lepiej, a ich wersje elektroniczne mają ponadto tę zaletę, że pomiar i obliczenia higrometryczne są wykonywane automatycznie.

5.4.3 Psychrometry Assmanna

W użyciu jest jeszcze pewna liczba psychrometrów Assmanna, które wykorzystują termometry cieczowe. Ze względu na wpływ różnych rozwiązań konstrukcyjnych na wynikowe parametry metrologiczne, wymagania dotyczące konstrukcji takich przyrządów są ściśle określone. Pomiary wilgotności względnej za pomocą psychrometru Assmanna wymagają użycia tablic psychrometrycznych [14] lub obliczeń za pomocą wzoru (5). Dokładność tych przyrządów jest ograniczona głównie przez zastosowanie termometrów cieczowych, znacznie mniej dokładnych od termometrów elektronicznych. Stosunkowo duże rozmiary psychrometru oraz konieczność każdorazowego zwilżania tamponu (knota) termometru wilgotnego przed pomiarem, znacznie ogranicza możliwości jego zastosowania.

5.4.4 Inne przyrządy i metody wzorcowania

Można czasem jeszcze spotkać przyrządy mechaniczne do pomiaru wilgotności, sięgające swoimi korzeniami ubiegłych stuleci. Są to różne konstrukcje działające na zasadzie dylatacji włosów czy membran organicznych, które rozszerzają się ze wzrostem wilgotności, przetwarzając wilgotność na wielkości mechaniczne. Są to więc czujniki sorpcyjne, ale ich wady są znacznie bardziej uciążliwe niż niedogodności stosowania współczesnych czujników impedancyjnych, przetwarzających wilgotność na sygnały elektryczne.

Warto wspomnieć, że w higrometrii stosowano również wzorce w postaci nasyconych roztworów soli nieorganicznych. Wzorców takich dotyczyło nawet zalecenie OIML [15]. Jednakże, ze względów praktycznych, rola takich wzorców i owej metody jest obecnie marginalna, a samo zalecenie zostało wycofane.

6. Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe pojęcia z dziedziny wilgotności powietrza i innych mieszanin parowo-gazowych, najważniejsze metody pomiarowe, me-

tody wzorcowania oraz najczęściej spotykane typy użytkowych przyrządów pomiarowych. Szczególną uwagę poświęcono praktycznym aspektom współczesnej higrometrii.

Omówiono w tej pracy stanowiska pomiarowe, które zostały zaprojektowane i zbudowane w ramach prac własnych Laboratorium Wilgotności GUM. Opracowanie metod pomiarowych i metod wzorcowania jest również dziełem pracowników naszego Laboratorium. Przedstawione w tym artykule możliwości pomiarowe Laboratorium Wilgotności GUM są potwierdzone pomyślnie zakończonym udziałem w kilku porównaniach międzynarodowych.

Literatura

- [1] Sonntag D.: *Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae*. Zeitschrift fur Metrologie, vol. 40 (5), pp. 340–344, 1990.
- [2] *Guide to the Measurement of Humidity*. The Institute of Measurement and Control, London 1996.
- [3] Hardy B.: *ITS-90 Formulations for Vapor Pressure, Frostpoint Temperature, Dewpoint Temperature and Enhancement Factors I n the Range -100 to +100 °C*. Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity & Moisture, vol. 1, 214–222, April 1998, NPL, Teddington, UK.
- [4] Kabza Z., Kostyrko K., Zator S., Łobzowski A., Szkolnikowski W.: *Regulacja mikroklimatu pomieszczenia*. Agencja Wydawnicza PAK-u, Warszawa, Listopad 2005.
- [5] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 listopada 2006 r. w sprawie legalnych jednostek miar (Dz. U. Nr 225, poz. 1638).
- [6] Kostyrko K.: *Etałonnij sorpcjonno gravimetriczeskij gigromieter*. Izmieritelnaja Tiechnika nr 11, 1976.
- [7] Wexler A., Hyland R. W., Rhodes S. W.: *A Comparison between the NBS Two-Pressure Humidity Generator and the NBS Standard Hygrometer*. Meas. and Control in Science and Industry, Vol. 3, Reinhold Publishing Company, 1965.
- [8] Bell S.: *Validation of the NPL Primary Gravimetric Hygrometer*. Papers and Abstracts from the third International Symposium on Humidity & Moisture, vol. 1, 20–27, April 1998, NPL, Teddington, UK.
- [9] Bell S.: *Validation of the NPL Primary Gravimetric Hygrometer*. Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity & Moisture, vol. 1, 62–67, April 1998, NPL, Teddington, UK.
- [10] Flakiewicz K.: *Implementation of the dew-point temperature generator as the primary standard in GUM*. Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity & Moisture, vol. 1, 62–67, April 1998, NPL, Teddington, UK.
- [11] Flakiewicz K.: *Improvement of the primary humidity standard in GUM*. Proc. 8th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, TEMPMEKO 2001, vol. 2, VDE Verlag GMBH, Berlin 2001.
- [12] Flakiewicz K.: *Instrukcja wzorcowania wzorcowych higrometrów punktu rosy z chłodzonym lustrem w odniesieniu do wzorca podstawowego – generatora temperatury punktu rosy*. Instrukcja wewnętrzna GUM.
- [13] Flakiewicz K.: *Błędy histerezowe w pomiarach wilgotności względnej*. Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 53 BIS (9'2007).
- [14] Kostyrko K., Szumowski J., Wyżkowska A.: *Tablice psychrometryczne i higrometryczne*. PWN Warszawa, 1986.
- [15] *The Scale of Relative Humidity of Air Certified against Saturated Salt Solutions*. International Recommendation OIML R 121 – 1990.

Badania wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne przyrządów pomiarowych

Tadeusz Wąsala

Główny Urząd Miar – Zakład Mechaniki i Akustyki

Przedstawiono badania wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne przyrządów pomiarowych wyposażonych w przetworniki nieelektrycznych wielkości wejściowych, ze szczególnym uwzględnieniem akustycznych przyrządów pomiarowych, kalibratorów, wzorców akustycznych i złożonych układów pomiarowych stosowanych w metrologii wielkości akustycznych. Omówiono zrealizowane w Głównym Urzędzie Miar stanowisko badawcze oraz metody wyznaczania współczynników ciśnieniowych wzorców akustycznych w szerokim zakresie częstotliwości. Przedyskutowano metody stosowane w Laboratorium Akustyki i Drgań do badania charakterystyk metrologicznych przyrządów pomiarowych zgłaszanych do zatwierdzenia typu. Wyniki badań własnych porównano z danymi deklarowanymi przez producentów przyrządów pomiarowych i wzorców akustycznych.

Słowa kluczowe: Pomiary akustyczne; wzorce akustyczne; kalibratory; ciśnienie statyczne; współczynniki ciśnieniowe; charakterystyki metrologiczne.

Investigation of the influence of static pressure on metrological characteristics of measuring instruments

This paper presents investigation of how the static pressure affects metrological characteristics of those measuring instruments, which comprise transducers of non-electric input quantities, in particular acoustic instruments, calibrators, acoustic standards and complex measuring systems employed in metrology of acoustic quantities. The testing system, designed and constructed at the Central Office of Measures (GUM) and methods for measuring pressure coefficients of acoustic standards in a broad range of acoustic frequencies are described. Investigations of metrological characteristics of measuring instruments submitted for type approval are discussed. Results of investigations performed at the Sound and Vibration Laboratory are compared with data declared by manufacturers of measuring instruments and acoustic standards.

Key words: Acoustic measurements; acoustic standards; calibrators; static pressure; pressure coefficients; metrological characteristics.

1. Wstęp

Zmiany parametrów środowiskowych, głównie ciśnienia atmosferycznego, wpływają na właściwości metrologiczne przyrządów pomiarowych. Współczesne przyrządy pomiarowe, a zwłaszcza przyrządy przeznaczone do pomiarów wielkości nieelektrycznych, wyposaża się w przetworniki przetwarzające daną wielkość fizyczną na sygnał elektryczny, co umożliwia dalsze przetwarzanie sygnału pomiarowego metodami elektrycznymi. Po przetworzeniu sygnału wejściowego na sygnał elektryczny następuje przetwarzanie informacji, na co nie mają już wpływu parametry środowiskowe. Z tego względu, elementem najbardziej podatnym na oddziaływanie otoczenia jest przetwornik pomiarowy.

Można rozróżnić dwa rodzaje oddziaływań: takie, które oddziałują na wejście toru pomiarowego i są addytywne w stosunku do sygnału wielkości mierzonej, oraz takie, któ-

re zmieniają geometrię lub właściwości materiałowe elementów przetwornika, powodując efekty multiplikatywne. Oprócz przyrządów pomiarowych wyposażonych w odbiorcze przetworniki pomiarowe, w metrologii wykorzystuje się również kalibratory przeznaczone do odtwarzania znanej wartości danej wielkości fizycznej, które również są podatne na oddziaływanie otoczenia.

Wpływ zmian temperatury i wilgotności powietrza na pomiary akustyczne jest znacznie mniejszy od efektów wynikających ze zmian ciśnienia statycznego. Ponadto, w warunkach laboratoryjnych można je zminimalizować poprzez stosowanie termostatów lub klimatyzację pomieszczeń pomiarowych. Zmiany ciśnienia statycznego, a w szczególności wahania ciśnienia atmosferycznego wywierają znacznie bardziej istotny wpływ na pomiary w akustyce i można je wyeliminować jedynie poprzez zastosowanie specjalnych komór pomiarowych wyposażonych w układy regulacji i stabilizacji ciśnienia powietrza.

Ze względu na dużą różnorodność stosowanych w praktyce przyrządów pomiarowych, rozważania w tej pracy koncentrują się na wpływie zmian ciśnienia statycznego na przyrządy stosowane w miernictwie wielkości akustycznych. Specyfika zjawisk fizycznych o charakterze falowym powoduje, że zmiany ciśnienia statycznego mają szczególnie duży wpływ na dokładność pomiarów w dziedzinie metrologii akustycznej, wykonywanych za pomocą mierników poziomu dźwięku i innych układów pomiarowych wyposażonych w mikrofony pomiarowe [1]. Wpływa to również na dokładność wzorcowania mierników poziomu dźwięku, co jest realizowane za pomocą kalibratorów akustycznych. Szereg norm i dokumentów metrologicznych określa szczegółowo wymagania metrologiczne dotyczące wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki mierników poziomu dźwięku, mikrofonów pomiarowych i kalibratorów akustycznych [2, 3]. Również przepisy wykonawcze, odnoszące się do pomiarów użytkowych w dziedzinie akustyki, wymagają kontroli warunków środowiskowych i uwzględniania poprawek wynikających z różnicy między aktualnymi wartościami parametrów środowiska, a parametrami warunków odniesienia.

Jednym z najistotniejszych parametrów środowiskowych jest ciśnienie atmosferyczne. Dlatego konieczne jest badanie i określenie współczynników liczbowych charakteryzujących zależny od częstotliwości stopień wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki

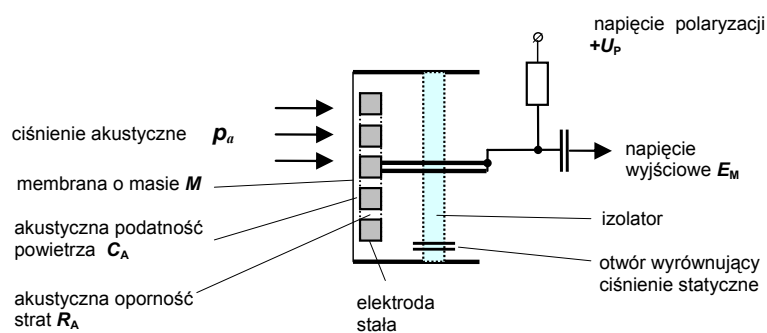


Rys. 1. Zestaw przetworników ciśnienia akustycznego (elektrostatyczne mikrofony pomiarowe) i wzorcowych źródeł ciśnienia akustycznego (kalibratory akustyczne).

metrologiczne akustycznych przyrządów pomiarowych. Współczynniki te wykorzystuje się następnie do korekcji wyników pomiarów podczas wzorcowania przyrządów, a także w pracach przy tworzeniu budżetu i szacowaniu niepewności wyników pomiarów.

2. Wpływ ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne mikrofonów pomiarowych

Do przetwarzania ciśnienia akustycznego na napięcie elektryczne stosuje się pomiarowe mikrofony elektrostatyczne, pokazane na rys. 1. Schemat budowy i zasadę działania takiego urządzenia ilustruje rys. 2. Metalowa membrana oraz sztywna, płaska elektroda mikrofonu tworzą kondensator elektryczny polaryzowany ze źródła napięcia stałego $+U_p$. Podatność akustyczna C_A warstwy powietrza między elektrodami oraz akustyczna oporność strat R_A w otworach elektrody stałej są wielkościami zależnymi od ciśnienia statycznego, temperatury, wilgotności powietrza i częstotliwości.



Rys. 2. Schemat budowy i zasada działania mikrofonu elektrostatycznego.

Przykładowo, zależność podatności akustycznej C_A od parametrów ośrodka przedstawia wzór

$$C_A = \frac{V_p}{p_0 \kappa} = \frac{V_p}{c^2 \rho_0}, \quad (1)$$

gdzie V_p – objętość przestrzeni powietrznej, p_0 – ciśnienie statyczne, κ – wykładnik adiabaty, c – prędkość dźwięku, ρ_0 – gęstość ośrodka. Również akustyczna oporność strat układu akustycznego, R_A , związana z układem równoległych kanałów (tj. otworów w elektrodzie stałej o łącznym polu przekroju poprzecznego S), wiąże prędkość objętościową V_0 z różnicą ciśnień po obu stronach kanałów i zależy liniowo od ciśnienia statycznego.

Wyznaczanie charakterystyk elementów składowych mikrofonu pomiarowego ma duże znaczenie zarówno przy tworzeniu schematów zastępczych rzeczywistych przetworników pomiarowych, jak i przy weryfikacji założonego modelu. Niezastąpionym narzędziem w tych pracach jest teoria analogii elektromechanicznych, umożliwiającą tworzenie schematów zastępczych i pozwalającą na modelowanie struktury oraz badanie własności dynamicznych układów akustycznych (w tym także mikrofonów pomiarowych i kalibratorów akustycznych) na podstawie znanych własności elementów składowych, w szerokim zakresie częstotliwości.

W praktyce, w mikrofonach elektrostatycznych, przy zmniejszaniu ciśnienia statycznego następuje wzrost akustycznej podatności powietrza między elektrodami, C_A , natomiast

akustyczna oporność strat, R_A , dla wyższych częstotliwości (zbliżonych do częstotliwości rezonansowej mikrofonu) zmniejsza się. W następstwie zmniejszania ciśnienia statycznego zwiększa się dobroć układu rezonansowego i zmniejsza częstotliwość rezonansowa mikrofonu.

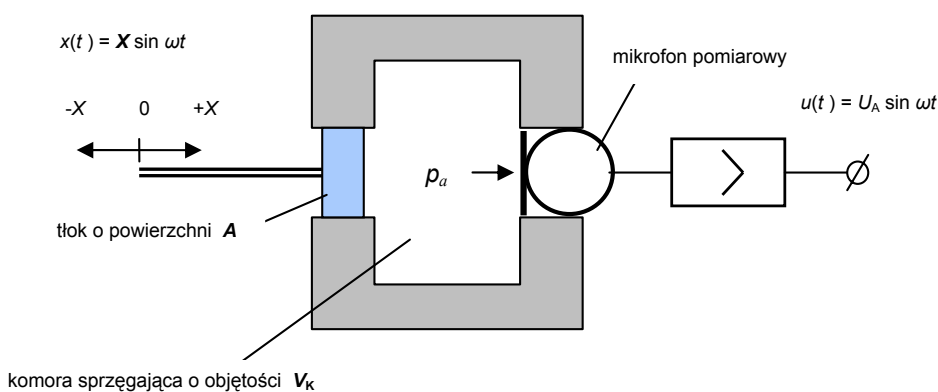
W zakresie średnich częstotliwości, obejmujących częstotliwości odniesienia 250 Hz i 1000 Hz, typowa wartość współczynnika ciśnieniowego wynosi $-0,0001$ dB/kPa. W pozostałych zakresach częstotliwości, zjawiska fizyczne i struktura modelu mikrofonu są znacznie bardziej złożone. W zakresie niskich częstotliwości, gdy przemiany zachodzące w gazie są wolnozmiennie, następuje wymiana energii (ciepła) z otoczeniem (tzn. odstępstwo od adiabatyczności przemian), zwiększają się straty energii akustycznej i zwiększa się równoważna podatność powietrza C_A ; efekt ten zachodzi także wskutek zmniejszania akustycznej oporności przepływowej w otworze wyrównującym ciśnienie. W zakresie wyższych częstotliwości, przy zmianach ciśnienia statycznego istotne staje się tłumienie drgań membrany i efekty falowe, zarówno na powierzchni membrany jak i wewnątrz mikrofonu.

3. Wpływ ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne kalibratorów akustycznych

W przypadku gazu idealnie sprężystego, w warunkach przemiany adiabatycznej, zależność między ciśnieniem akustycznym p_a a ciśnieniem statycznym p_0 jest liniowa i zależy od wykładnika adiabaty κ oraz od chwilowej, względnej zmiany gęstości ośrodka ($d\rho/\rho_0$),

$$p_a = p_0 \kappa \frac{d\rho}{\rho_0}. \quad (2)$$

Zależność ta jest wykorzystywana w kalibratorze akustycznym z pobudnikiem tłokowym [4], którego zasadę działania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat budowy i zasada działania kalibratora akustycznego z pobudnikiem tłokowym.

Wartość skuteczną ciśnienia akustycznego wytwarzanego w komorze o objętości V_K , przy sinusoidalnym ruchu płaskiego tłoka o powierzchni A i amplitudzie wychylenia X , opisuje zależność

$$p_a = \frac{p_0 \kappa A X}{\sqrt{2V_K}}, \quad (3)$$

natomiast wartość poprawki ciśnienia akustycznego ΔL_p , wyrażoną w dB, przy odchyleniu ciśnienia atmosferycznego p_0 (mierzonego w hPa) od wartości odniesienia 1013,25 hPa, określa wzór

$$\Delta L_p = 20 \log \frac{P_0}{1013,25} . \quad (4)$$

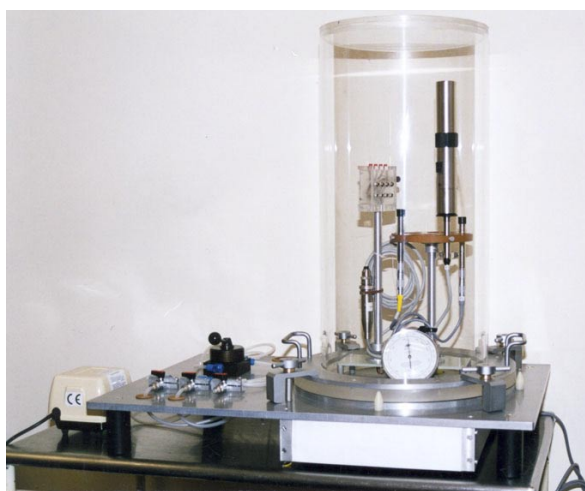
Kalibrator akustyczny z pobudnikiem tłokowym jest wzorcem obliczeniowym. W praktyce pomiarowej rozpowszechniły się kalibratory membranowe, przeważnie z pobudnikiem piezoceramicznym, zasilanym z wewnętrznego generatora napięcia sinusoidalnego. Kalibratory najnowszej generacji wyposażone są w układy stabilizacji poziomu ciśnienia akustycznego z wewnętrznymi przetwornikami ciśnienia, kompensującymi wpływ zmian ciśnienia atmosferycznego.

4. Stanowisko badawcze

Głównym elementem stanowiska pomiarowego w Laboratorium Akustyki i Drgan GUM, pokazanego na rys. 4, jest komora ciśnieniowa w postaci cylindra odłączanego od podstawy stanowiska pomiarowego, wyposażonego w pompę powietrza i zewnętrzny cyfrowy miernik ciśnienia statycznego [5]. Pompa umożliwia uzyskanie ciśnienia powietrza w komorze w zakresie od 52 kPa do 130 kPa. Podczas napełniania i opróżniania komory, kaskadowo połączone zawory pozwalają na płynną regulację szybkości zmian ciśnienia powietrza w komorze w zakresie od 0,1 hPa/s do 3 hPa/s. Konstrukcja komory zapewnia bardzo dobrą szczelność, której miarą jest zmiana ciśnienia wewnętrznego w czasie. Przykładowo, przy ciśnieniu powietrza w komorze 120 kPa, jego zmiana po 100 godzinach nie przekroczyła 0,06 kPa. Można zatem twierdzić, że badania w komorze ciśnieniowej, trwające przeciętnie ok. pół godziny, odbywają się przy stałej, zadanej wartości ciśnienia statycznego.

Stanowisko pomiarowe z komorą ciśnieniową dostosowane jest do równoczesnych badań w czterech kanałach pomiarowych, z zastosowaniem czterech kalibratorów akustycznych lub czterech pobudników elektrostatycznych i czterech torów mikrofonowych.

Stanowisko pomiarowe wyposażono również w drugi, znacznie większy cylinder o objętości 93 dm³, pokazany na rys. 5. Stało się to niezbędne ze względu na duże rozmiary aku-



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe z komorą ciśnieniową o objętości 30 dm³.



Rys. 5. Stanowisko pomiarowe z komorą ciśnieniową o objętości 93 dm³ oraz akustyczna sonda pomiarowa stosowana w systemach monitoringu hałasów lotniczych.

stycznych sond pomiarowych stosowanych w systemach monitoringu hałasu w środowisku, a zwłaszcza hałasów lotniczych.

5. Metody badania wpływu ciśnienia statycznego

Wielkością charakteryzującą stopień wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne kalibratorów akustycznych jest współczynnik ciśnieniowy k_p , odzwierciedlający relację między zmianą poziomu ciśnienia akustycznego ΔL_a wytwarzanego za pomocą kalibratora, a wywołującą ją zmianą ciśnienia statycznego Δp_0

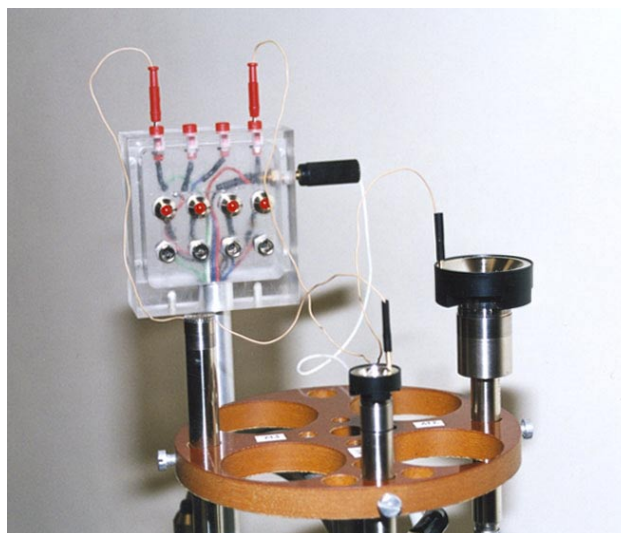
$$k_p = \frac{\Delta L_a}{\Delta p_0} \quad (5)$$

Po połączeniu kalibratora z mikrofonem wzorcowym o współczynniku ciśnieniowym wyznaczonym przy częstotliwości takiej samej, jak częstotliwość badanego kalibratora, wykonywane są pomiary w zakresie ciśnienia powietrza w komorze od 65 kPa do 108 kPa [2, 3].

Stopień wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne mikrofonów pomiarowych (lub przyrządów wyposażonych w mikrofony pomiarowe) określa zależny od częstotliwości współczynnik ciśnieniowy k_p , który opisuje relację między zmianą skuteczności mikrofonu ΔS (lub zmianą wskazania mierzonego poziomu ciśnienia akustycznego ΔL_a), a wywołującą ją zmianą ciśnienia statycznego Δp_0

$$k_p = \frac{\Delta S}{\Delta p_0} \quad \text{lub} \quad k_p = \frac{\Delta L_a}{\Delta p_0} \quad (6)$$

W badaniach mikrofonów pomiarowych, źródłem sygnałów akustycznych są kalibratory tłokowe pracujące przy częstotliwości 250 Hz lub kalibratory membranowe typu 4231 o częstotliwości 1000 Hz i współczynnikiem ciśnieniowym $+8 \cdot 10^{-6}$ dB/kPa [6]. Do wyznaczenia współczynników ciśnieniowych w zakresie od 20 Hz do 100 kHz stosuje się pobudniki elektrostatyczne, które symulują działanie płaskiej fali akustycznej o amplitudzie ciśnienia akustycznego niezależnej od częstotliwości w szerokim zakresie drgań. Drgania mechaniczne membrany mikrofonu wymuszane są za pomocą zewnętrznego, stałego, jednorodnego pola elektrycznego, modulowanego sinusoidalnym sygnałem pomiarowym o regulowanej częstotliwości. Rysunek 6 przedstawia pobudniki elektrostatyczne stosowane w Laboratorium Akustyki i Drgań Głównego Urzędu Miar.



Rys. 6. Pobudniki elektrostatyczne do badań w szerokim zakresie częstotliwości.

6. Wyniki badań wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki częstotliwościowe skuteczności mikrofonów

Pomiary wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki częstotliwościowe skuteczności mikrofonów wzorcowych klasy WS1P typu 4144, klasy WS1F typu 4145, klasy WS2P typu 4134, 4166 i 4180 oraz klasy WS2F typu 4133, wykazały następującą prawidłowość:

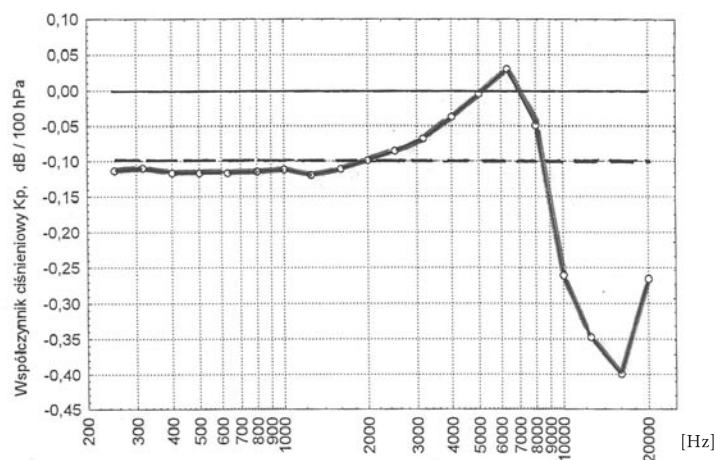
- W zakresie niższych częstotliwości, obejmującym stosowane przy wzorcowaniu częstotliwości odniesienia 250 Hz i 1000 Hz, wartości współczynników ciśnieniowych k_p są stałe i zbliżone do wartości deklarowanych przez producenta dla tych typów mikrofonów.
- W obszarze rezonansu mikrofonu oraz przy wyższych częstotliwościach, ujawnia się duża zmienność współczynnika ciśnieniowego k_p w funkcji częstotliwości, który może wówczas osiągać wartości wielokrotnie większe od wartości deklarowanych dla zakresu niższych częstotliwości.

W tabeli 1 podano przykładowe wartości współczynnika ciśnieniowego dla częstotliwości 1000 Hz, zmierzone w Laboratorium Akustyki i Drgań GUM dla mikrofonów wybranych klas i typów.

Tab. 1. Zestawienie zmierzonych wartości współczynnika ciśnieniowego k_p skuteczności mikrofonów klasy WS2P i WS2F przy częstotliwości 1000 Hz.

Typ mikrofonu pomiarowego	4134	4166	4180	4133
Wartość współczynnika ciśnieniowego k_p skuteczności mikrofonu [dB/kPa]	$-4,5 \cdot 10^{-5}$	$-1,2 \cdot 10^{-4}$	$-5,2 \cdot 10^{-5}$	$-3,8 \cdot 10^{-5}$

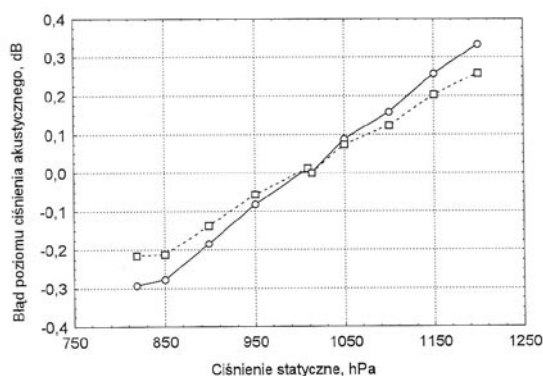
Rysunek 7 przedstawia przykładowy przebieg zmienności współczynnika ciśnieniowego skuteczności mikrofonu ciśnieniowego typu 4166 w rozszerzonym zakresie częstotliwości.



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa współczynnika ciśnieniowego mikrofonu typu 4166. Wartość współczynnika ciśnieniowego, zadeklarowana przez producenta, zaznaczona jest linią przerywaną.

7. Wyniki badań wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne kalibratorów akustycznych

Badania kalibratorów akustycznych, prowadzone w celu określenia wpływu ciśnienia statycznego na ich charakterystyki metrologiczne, wymagają zastosowania mikrofonów pomiarowych o jak najmniejszym współczynniku ciśnieniowym przy częstotliwości badanego



Rys. 8. Charakterystyka wpływu ciśnienia statycznego na poziom ciśnienia akustycznego wytwarzanego za pomocą badanego kalibratora. Linia ciągła przedstawia wartości bez uwzględnienia poprawek, zaś linia przerywana odpowiada wartościom skorygowanym ze względu na współczynnik ciśnieniowy.

kalibratora. Rysunek 8 przedstawia przykładową charakterystykę badanego kalibratora akustycznego o częstotliwości 1000 Hz. Widać wyraźnie, jak istotną rolę odgrywają poprawki ciśnieniowe, określone na podstawie indywidualnie wyznaczonych wartości współczynnika ciśnieniowego mikrofonu wzorcowego, szczególnie przy większych odstępstwach ciśnienia statycznego od wartości ciśnienia odniesienia 1013,25 hPa.

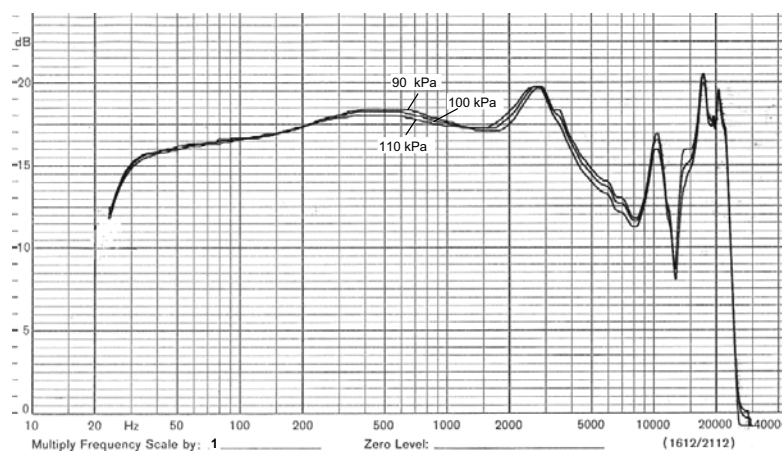
8. Wyniki badań wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne złożonych układów akustycznych

Przykład złożonego układu akustycznego pokazany jest na rys. 9. Jest on stosowany przy wzorcowaniu audiometrycznego sprzęgacza akustycznego typu 4153, zawierającego wewnętrzny mikrofon pomiarowy klasy WS2P. Wzorcowanie wykonywane jest przy pomocy słuchawki pomiarowej Bayer Dynamic typu DT48, pracującej jako szerokopasmowe źródło sygnału akustycznego.



Rys. 9. Przykład złożonego akustycznego układu pomiarowego: audiometryczny sprzęgacz akustyczny typu 4153, połączony ze słuchawką pomiarową DT48 stanowiącą źródło ciśnienia akustycznego.

Wpływ zmian ciśnienia statycznego na właściwości słuchawki pomiarowej i sprzęgacza akustycznego jest znacznie większy niż na zastosowany mikrofon pomiarowy. Na rys. 10 przedstawiono trzy charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia



Rys. 10. Charakterystyka częstotliwościowa funkcji przenoszenia audiometrycznego sprzęgacza akustycznego typu 4153, połączony ze słuchawką pomiarową DT48 dla trzech wartości ciśnienia statycznego.

audiometrycznego sprzęgacza akustycznego typu 4153, wykonane przy trzech wartościach ciśnienia statycznego, różniących się o ± 10 kPa. Wykres umożliwia określenie tych zakresów częstotliwości, w których wpływ zmian ciśnienia statycznego jest nieznaczny oraz tych zakresów, w których jest on szczególnie duży. Przy częstotliwości 250 Hz, stosowanej jako częstotliwość odniesienia, wpływ zmian ciśnienia statycznego nie jest znaczący, natomiast przy częstotliwości 1000 Hz jest zauważalny.

9. Podsumowanie

Ciśnienie statyczne w złożony sposób wpływa na działanie mikrofonów pomiarowych i kalibratorów akustycznych, zwłaszcza przy pomiarach w rozszerzonym zakresie częstotliwości.

W badaniach układów akustycznych niezwykle pomocne jest tworzenie i analiza układów zastępczych, z wykorzystaniem teorii analogii elektromechanicznych. Niezbędnym elementem takich analiz jest uwzględnienie charakterystyk wielkości wpływających, a przede wszystkim dominującego wpływu ciśnienia statycznego.

W Laboratorium Akustyki i Drgań zbudowano stanowisko badawcze oraz opracowano metody pomiarowe do wyznaczania współczynników ciśnieniowych, które są niezbędne do korekcji charakterystyk metrologicznych kalibratorów akustycznych i mikrofonów pomiarowych w szerokim zakresie częstotliwości. Przedstawione w tej pracy wyniki badań wskazują na wysoką przydatność opracowanego stanowiska pomiarowego i zdolność Laboratorium do wykonywania specjalistycznych badań w dziedzinie metrologii wielkości akustycznych.

Literatura

- [1] Wong G., Embleton T.: *AIP Handbook of Condenser Microphones. Theory, Calibration, and Measurements*. American Institute of Physics, New York, 1984.
- [2] PN-EN 60942 *Elektroakustyka. Kalibratory akustyczne*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2005.
- [3] PN-EN 61672-2 *Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku. Część 2: Badania typu*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2004.
- [4] *Pistonphone type 4228. Technical Documentation*. Brüel & Kjær, Nærum, 1991, Dania.
- [5] Wąsala T.: *Komora ciśnieniowa do badania wzorców akustycznych*. Materiały XXXI Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych, Polskie Towarzystwo Akustyczne, Ustroń, 2003.
- [6] *Sound Level Calibrator Type 4231. Technical Documentation*. Brüel & Kjær, Nærum, 1999, Dania.

Podejścia związane z wyrażaniem niepewności pomiaru

Na przestrzeni ostatnich lat nastąpiły zmiany w dziedzinie wyrażania niepewności pomiaru. Zaowocowało to koniecznością wprowadzenia szeregu nowych terminów związanych z wyrażaniem niepewności, co znalazło odzwierciedlenie w najnowszym słowniku metrologicznym, w trzeciej edycji VIM (*International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms*). We wstępie do tego dzieła autorzy podkreślają dwa podejścia, jedno związane z tradycyjną koncepcją opartą na statystycznej analizie błędu pomiaru (*Error Approach, Traditional Approach* lub *True Value Approach*), drugie związane z teorią niepewności opartą na probabilistycznej metodzie propagacji rozkładów (*Uncertainty Approach*).

Oba podejścia przyjmują założenie o wyznaczaniu niepewności pomiaru na podstawie rozkładu związanego z wynikiem pomiaru, lecz w pierwszym przypadku jest to rozkład o charakterze statystycznym, a w drugim o charakterze probabilistycznym. Różnica pomiędzy tymi rozkładami polega na tym, iż w przypadku rozkładu statystycznego jego parametry są zmiennymi losowymi, a w przypadku rozkładu probabilistycznego parametry są liczbami stałymi. W pierwszym wypadku mamy do czynienia z zagadnieniem zmienności tych parametrów; w drugim przypadku taka sytuacja jest wyeliminowana, ponieważ wyznaczone parametry pozbawione są wewnętrznej niepewności. Aby odróżnić oba podejścia zaproponowano zróżnicowanie terminologiczne dotyczące wyrażania niepewności w obu sytuacjach. Szczególnie dotyczy to takich pojęć jak **przedział ufności** (*confidence interval*) i **przedział rozszerzenia** (*coverage interval*) oraz **poziom ufności** (*confidence level*) i **prawdopodobieństwo rozszerzenia** (*coverage probability*). Terminy **przedział ufności** i **poziom ufności** związane są z rozkładem statystycznym (otrzymanym na podstawie serii obserwacji), a pojęcia: **przedział rozszerzenia** i **prawdopodobieństwo rozszerzenia** z rozkładem probabilistycznym (otrzymywanym metodą propagacji rozkładów wielkości wejściowych poprzez model matematyczny wielkości wyjściowej). O ile pojęcia związane z rozkładem statystycznym (zmiennej losowej związanej z ograniczoną liczebnie serią obserwacji) są dobrze znane w krajowej literaturze naukowej, o tyle pojęcia związane z rozkładem probabilistycznym (zmiennej losowej ciągłej lub dyskretnej związanej z populacją) są pojęciami nowymi. Językowo nawiązują do terminu **współczynnik rozszerzenia** (*coverage factor*), z założeniem, że w tym kontekście słowo **coverage** można tłumaczyć jako **rozszerzenie**. Należy w tym miejscu dodać, że w dokumentach krajowych pojęcie **coverage interval** występuje również pod nazwą **przedział objęcia** [Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. GUM 1999] lub **przedział pokrycia** [PN-ISO 3534-1].

W pierwszym podejściu zakłada się istnienie hipotetycznej, pojedynczej lecz niepoznawalnej wartości prawdziwej związanej z wielkością mierzoną. Celem analizy jest wyznaczenie przedziału ufności zawierającego z określonym prawdopodobieństwem tę hipotetyczną wartość. Przedział buduje się wokół wartości średniej otrzymanej na podstawie serii obserwacji. Zakłada się przy tym, że wszystkie obserwacje wywodzą się z populacji o rozkładzie normalnym.

W tym miejscu należy dodać, iż historycznie zagadnienie wartości prawdziwej związanej z wynikiem pomiaru pojawia się w pracach prekursorów współczesnej metrologii. Już w XVIII wieku uświadomiono sobie, że żaden wynik pomiaru nie będzie zgodny z domniemaną wartością prawdziwą. Przy każdym pojedynczym pomiarze popełnia się pewien błąd wynikający z losowości odczytu wartości obserwacji. Pozostaje zatem zawsze pewna nieznaną różnica pomiędzy wartością obserwacji i jej wartością prawdziwą. Jednym z pierwszych myślicieli, który zastanawiał się na kwestię rozkładu dla tej przypadkowej różnicy, czyli błędu pomiaru, był Thomas Simpson (1710 – 1761). W 1757 roku zastanawiając się nad kształtem krzywej błędu pomiaru wywnioskował, że jeżeli błąd zawiera się w granicach określonego odcinka, to wyniki pomiaru powinny się powtarzać proporcjonalnie do ciągu liczbowego: 1, 2, ..., n , ..., 2, 1, przyjmując wartości w obrębie tego przedziału. Było to pierwsze w historii wyobrażenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa błędu pomiaru, w postaci dyskretnej. Jak można się łatwo domyśleć miała ona postać trójkąta równoramiennego, dlatego rozkład trójkątny często nazywany jest rozkładem Simpsona. Zagadnieniem rozkładu dla błędu pomiaru zajmował się również Pierre Simon Laplace (1749 – 1827). W latach siedemdziesiątych XVIII stulecia formułuje on trzy warunki dotyczące krzywej (rozkładu) błędu: (1) symetryczna względem wartości prawdziwej; (2) dąży do zera oddalając się od wartości prawdziwej; (3) obszar (pole powierzchni pod krzywą błędu) jest równy jeden. W 1777 roku stawia wniosek, że krzywa rozkładu błędu opisana jest funkcją logarytmiczną, lecz w roku 1810 poprawia swoje wnioskowanie na rzecz krzywej dzwonowej, formułując tezę centralnego twierdzenia granicznego i przyznając tym samym rację propozycji Carla Friedricha Gaussa (1777 – 1855) z 1809 roku.

Drugie podejście (*Uncertainty Approach*) nie przyjmuje założenia o istnieniu hipotetycznej, pojedynczej wartości prawdziwej, ale traktuje każdą wartość, którą można przypisać wielkości mierzonej jako jej wartość prawdziwą. W związku z powyższym każdej wielkości można przypisać określony zbiór możliwych wartości. Zbiór taki można wyznaczyć i przedstawić w postaci rozkładu prawdopodobieństwa. Obliczenia wykonuje się metodą propagacji rozkładów przypisanych wielkościom wejściowym poprzez model matematyczny wielkości wyjściowej. Propagację można realizować metodą Monte Carlo, a w przypadku modeli linowych (na ogół dla pomiarów bezpośrednich lub pośrednich linearyzowanych) również przy użyciu operacji splotu matematycznego. Miarą niepewności pomiaru jest długość przedziału rozszerzenia rozkładu wyjściowego, obliczana dla określonego prawdopodobieństwa rozszerzenia, na ogół równego 95 %. Koncepcja ta znajduje wyraz w nowym dokumencie dotyczącym wyrażania niepewności pomiaru: JCGM 101:2008, wydanym przez Międzynarodowe Biuro Miar.

Obok koncepcji *Uncertainty Approach* we współczesnej literaturze metrologicznej dyskutowana jest metodyka bayesianska opracowania danych pomiarowych. Podejście to opiera się na twierdzeniu Thomasa Bayesa (1702 – 1761) o prawdopodobieństwie warunkowym. Teoria prawdopodobieństwa warunkowego pozwala na łączenie informacji o wielkości mierzonej pochodzącej spoza pomiaru z danymi pomiarowymi. Wiedza o wielkości mierzonej nigdy nie jest kompletna, ale można ją jedynie przybliżyć łącząc ze sobą informacje różnej natury. Koncepcja powyższa sprowadza się do tezy, że rozkład prawdopodobieństwa wielkości mierzonej, w postaci zbioru możliwych dla niej wartości, powstały w oparciu o dostępną wiedzę, aktualizowany jest na podstawie informacji dostarczanych przez dane pomiarowe. Ideę takiego podejścia wyraża projekt dokumentu *Supplement to the Guide*

– *Concepts and basic principles* z 2006 roku. W tym miejscu można zauważyć, że historia zatacza koło, gdyż początki zagadnień związanych z niepewnością pomiaru należy wiązać z postaciami wspomnianych już matematyków, Thomasa Simpsona i Thomasa Bayesa.

Generalnie, zagadnienia związane z niepewnością pomiaru znajdują coraz więcej miejsca w międzynarodowej literaturze metrologicznej, stając się powoli wiodącą problematyką teoretyczną. Świadczy o tym stale rosnąca liczba publikacji dotycząca tych zagadnień. Tylko w latach 2006 – 2008, w takich czasopismach jak „Metrologia”, „Measurement Science and Technology” oraz „Measurement” opublikowanych zostało około 200 artykułów poświęconych problematyce niepewności pomiaru. Wiodącą rolę odgrywa tu czasopismo „Metrologia” z liczbą znacznie przekraczającą 100 publikacji na powyższy temat. Należy dodać, że czasopismo to ma najwyższy wskaźnik liczby cytowań (*impact factor*) z wymienionych trzech periodyków, co świadczy o stale rosnącym zainteresowaniu teoretyczną problematyką metrologii w całej literaturze naukowej.

Poza licznymi artykułami, w ostatnich latach wydanych zostało prawie 20 książek naukowych i ponad 10 przewodników (dostępnych również w wersji elektronicznej na stronach internetowych takich instytucji jak BIPM, OIML, NIST, EURACHEM czy EA) dotyczących wyrażania niepewności pomiaru. Zbiór ten tworzy pokaźny międzynarodowy dorobek w dziedzinie metrologii.

Paweł Fotowicz

Nadanie stopnia doktora nauk technicznych



W dniu 25 listopada 2009 roku Rada Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej nadała stopień doktora nauk technicznych naszemu koledze Panu Pawłowi Fotowiczowi. Obrona rozprawy doktorskiej pt. *Analityczna metoda obliczania niepewności pomiaru i jej zastosowanie przy opracowaniu wyników pomiaru małych średnic zewnętrznych laserowym przyrządem skanującym* odbyła się 27 października 2009 roku. Praca ta została wyróżniona.

Promotorem pracy był Pan Profesor Ryszard Jabłoński, a recenzentami Pan Profesor Marek Dobosz i Pan Profesor Stanisław Adamczak. W publicznej obronie rozprawy wraz z pracownikami administracji miar uczestniczył również wiceprezes GUM, Pan Włodzimierz Popiołek.

Pan Doktor Paweł Fotowicz jest autorem i współautorem ponad stu publikacji w postaci artykułów w czasopismach naukowych oraz referatów na konferencjach naukowych. Opublikował materiały w takich czasopismach krajowych jak PAR, PAK, Mechanik, Przegląd Mechaniczny, Przegląd Elektrotechniczny czy Analityka oraz w czasopismach zagranicznych takich jak „OIML Bulletin”, „Measurement” czy „Metrologia”. Jego artykuły na łamach czasopism zagranicznych spotkały się już z dziesięcioma cytowaniami w międzynarodowej prasie naukowej. Autor współpracuje z prestiżową redakcją czasopisma „Metrologia”, działającą pod egidą Międzynarodowego Biura Miar, jako jej stały recenzent międzynarodowy. Współredaguje również nasz Biuletyn GUM, publikując na jego łamach materiały dotyczące aktualnych zagadnień metrologii naukowej. Specjalizuje się w problematyce niepewności pomiaru.

Redakcja

Informacja o rozprawie doktorskiej

Analityczna metoda obliczania niepewności pomiaru i jej zastosowanie przy opracowaniu wyników pomiaru małych średnic zewnętrznych laserowym przyrządem skanującym

Praca przedstawia analityczną metodę obliczania niepewności pomiaru, służącą do opracowania wyniku pomiaru wyrażanego w postaci przedziału rozszerzenia, zgodnie z przyjętymi definicjami zawartymi w najnowszych międzynarodowych, metrologicznych dokumentach dotyczących analizy danych pomiarowych. Metoda jest alternatywna w stosunku do zalecanej tam numerycznej metody odniesienia (Monte Carlo), gdy mamy do czynienia z liniowym lub linearyzowanym modelem pomiaru. Metoda analityczna nie wymaga zastosowania zaawansowanych, specjalistycznych programów komputerowych i może być w prosty sposób implementowana do powszechnie dostępnych narzędzi obliczeniowych, np. w postaci arkusza kalkulacyjnego. Jej dokładność obliczeniowa jest porównywalna z metodą odniesienia, a jej błąd obliczeniowy jest o rząd wielkości mniejszy od stosowanej w praktyce metody Welch-Satterthwaite'a. Pozwala na wyznaczanie niepewności rozszerzonej dla prawdopodobieństwa 95 % z zachowaniem wiarygodności drugiej cyfry znaczącej. Jest zatem pod tym względem bardziej efektywna od innych sposobów obliczania niepewności pomiaru proponowanych w literaturze.

Metoda analityczna powstała jako technika obliczeniowa służąca do realizacji postulatów, dotyczącego wyznaczania współczynnika rozszerzenia w procedurach szacowania niepewności pomiaru przy wzorcowaniu, wyrażonego w dokumencie EA-4/02. Postulat ten mówi o konieczności wyznaczania współczynnika rozszerzenia dla prawdopodobieństwa 95 % na podstawie rzeczywistego rozkładu prawdopodobieństwa estymaty wielkości wyjściowej. Przy czym przez rzeczywisty można rozumieć rozkład powstały w wyniku złożenia rozkładów przypisanych poszczególnym wielkościom wejściowym. Matematyczne modele pomiaru stosowane przy wzorcowaniu to równania liniowe lub linearyzowane, gdzie wielkości wejściowe traktowane są na ogół jako zmienne losowe niezależne. Stwarza to warunki do zastosowania operacji splotu matematycznego do wyznaczania rzeczywistego rozkładu dla wielkości wyjściowej i obliczania współczynnika rozszerzenia jako kwantyla tego rozkładu dla określonego prawdopodobieństwa rozszerzenia. Rozwiązanie to jest szczególnie przydatne przy podawaniu powyższego współczynnika w świadectwach wzorcowania. Ponieważ zagadnienie to dotyczyło głównie pomiarów związanych zapewnieniem spójności pomiarowej, to metoda została pierwotnie opublikowana w „OIML Bulletin”, biuletynie Międzynarodowej Organizacji Metrologii Prawnej. Następnie przedstawiono ją w czasopiśmie naukowym „Measurement”. W tym czasie toczyła się międzynarodowa dyskusja dotycząca wyrażania niepewności pomiaru w postaci przedziału rozszerzenia, wyznaczanego metodą propagacji rozkładów wielkości wejściowych na podstawie modelu matematycznego dla wielkości wyjściowej. Wraz z przyjęciem nowych rozwiązań w tej dziedzinie została zaproponowana analityczna metoda obliczenia samego przedziału rozszerzenia i opublikowana w czasopiśmie „Metrologia”, redagowanym przez Międzynarodowe Biuro Miar.

Przedmiotem analizy metrologicznej były wyniki uzyskane przy pomiarze średnicy laserowym przyrządem skanującym. Wyniki te wskazywały, że w przypadku stabilnego i powtarzalnego pomiaru wielkości mierzonej składowa przypadkowa wpływa w niewielkim stopniu na niepewność pomiaru. Znacznie większą rolę odgrywa rozdzielczość pomiaru, a przede wszystkim błąd systematyczny pomiaru.

Cechą dobrze wykonywanego pomiaru jest wysoka powtarzalność obserwacji. Powoduje to, że rozrzut wyników nie ma decydującego udziału w niepewności, a jej wartość może być znacznie większa, niż to wynika z analizy statystycznej danych pomiarowych. Tak właśnie jest w przypadku pomiaru średnicy laserowym przyrządem skanującym.

Przyrządy powyższe, zwane również skanerami pomiarowymi, wykorzystuje się do bezstykowych pomiarów poprzecznych wymiarów zewnętrznych elementów maszynowych, takich jak wałki, druty czy włókna. Zasada ich działania polega na pomiarze czasu przesłonięcia wiązki promienia laserowego przemiatanego wzdłuż mierzonego wymiaru. Ze względu na bezstykowość, szybkość i częstotliwość pomiaru chętnie stosowane są w przemyśle, szczególnie na liniach produkcyjnych lub przy kontroli jakości tych elementów, gdyż mierzony obiekt może przemieszczać się w trakcie pomiaru w określonym obszarze pomiarowym. Ich zaletą jest również to, że z powodu nieskomplikowanej budowy, są odporne na zakłócenia i koszt ich wykonania jest stosunkowo niewysoki.

Skanery pomiarowe były konstruowane i wykonywane w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej na zamówienie zewnętrznych zlecniodawców przemysłu krajowego, przy dużym udziale autora niniejszej rozprawy. Powstało szereg urządzeń pomiarowych, najczęściej wykorzystywanych do pomiaru średnic włókien światłowodowych i kalibrowanych drutów, na ogół w warunkach produkcyjnych, w przemyśle optycznym i elektronicznym. Działaniom tym towarzyszyło uzyskanie dużej ilości wiarygodnych danych pomiarowych, otrzymanych w wyniku długotrwałych prac badawczych. Umożliwiły one rozpoznanie przyczyn wpływających na niepewność pomiaru, której główną składową jest błąd systematyczny. Błąd ten powstaje na skutek przemieszczania się obiektu mierzonego wewnątrz obszaru pomiarowego. Ponieważ nie jest znane położenie elementu, możliwa jest jego dowolna pozycja w obrębie tego obszaru z założeniem jednakowego prawdopodobieństwa. Założenie to przyjęto ze względu na brak podstaw do wyróżnienia uprzywilejowanej pozycji mierzonego obiektu wewnątrz tego obszaru.

Błąd systematyczny traktowany jest probabilistycznie jako składowa przedziału rozszerzenia. Jego wartość graniczna została oszacowana na podstawie wykonanej analizy matematycznej, przeprowadzonej w oparciu o rozpoznane zjawiska związane z pomiarem, przy wykorzystaniu zasad i rozwiązań z dziedziny optyki laserów. W pracy porównano obliczone wartości graniczne z wartościami błędu systematycznego otrzymanymi na podstawie danych eksperymentalnych. Odpowiednie wartości doświadczalne mieszczą się w wyznaczonych przedziałach rozszerzenia, co świadczy o poprawnym modelowaniu tego błędu.

Przy obliczeniach zastosowano procedurę dotychczas wykorzystywaną jedynie do opracowania wyników pomiaru przy wzorcowaniu. W rozprawie doktorskiej procedura ta została adoptowana do potrzeb dowolnego pomiaru bezpośredniego. Stanowi ona przejrzystą metodę opracowania wyniku pomiaru z uwzględnieniem budżetowania zasadniczych składowych niepewności.

Rozprawa stawia tezy naukowe związane zarówno z oceną dokładności samej metody analitycznej, jak i jej zastosowaniem w analizie niepewności pomiaru uzyskanego przy

użyciu laserowego przyrządu skanującego. Tezy te prowadzą do dalej idącego wniosku, że analityczną metodę obliczania niepewności można zastosować w celu praktycznego opracowania wyniku pomiaru bezpośredniego, szczególnie gdy mamy do czynienia ze znaczącym i zmiennym błędem systematycznym. Wynik takich obliczeń uświadamia, że błąd systematyczny może być dominującą i zmienną składową budżetu niepewności pomiaru, w sytuacji gdy składowa przypadkowa podlega znacznie mniejszym zmianom i wnosi niewielki udział do niepewności wynikowej. Udział ten może być znacznie większy z tytułu rozdzielczości wskazań, szczególnie gdy wyniki obserwacji są powtarzalne. Świadczy to o tym, że sama analiza statystyczna serii obserwacji nie wystarcza do obiektywnej oceny niepewności i musi być uzupełniona przez dodatkowe analizy oparte na wiedzy dotyczącej samego pomiaru. Ta metodyka postępowania jest obecnie podstawą oceny niedokładności pomiaru, stosowaną coraz powszechniej we współczesnej metrologii.

Paweł Fotowicz

Informacja o udziale pracowników Głównego Urzędu Miar i Okręgowych Urzędów Miar w wydarzeniach metrologicznych w roku 2009

1. VIII Sympozjum nt. Niepewności Pomiaru

W dniach 16 – 20 lutego 2009 r. w Świnoujściu odbyło się VIII Sympozjum nt. Niepewności Pomiaru, pod patronatem Głównego Urzędu Miar.

Sympozjum organizowane jest corocznie przez Zakład Metrologii Instytutu Automatyki Przemysłowej (Wydział Elektryczny Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie) i w tym roku zgromadziło 32 uczestników. Uczestniczyli w nim pracownicy Głównego Urzędu Miar z Wiceprezesem GUM, Panem Włodzimierzem Popiołkiem oraz pracownicy Okręgowych Urzędów Miar, Centralnego Wojskowego Ośrodka Metrologii, instytutów naukowo-badawczych, laboratoriów akredytowanych i uczelni wyższych.

Pracownicy GUM przedstawili referat, pt. *Niepewność pomiarów a spójność pomiarowa i porównania międzylaboratoryjne w dziedzinie energii elektrycznej*. Autorami wystąpienia byli Andrzej Tomaszewski, Jerzy Szutkowski i Henryk Wysocki.

2. EuroLab 2009, XI Międzynarodowe Targi Analityki i Technik Pomiarowych

W dniach 4 – 6 marca 2009 r. w Warszawie, po raz pierwszy w nowo otwartym Centrum Targowo-Kongresowym MT Polska, odbyła się XI edycja targów EuroLab.

Główny Urząd Miar tradycyjnie już wystąpił z cyklem wykładów obejmujących szeroki zakres zagadnień metrologicznych. Pracownicy GUM zaprezentowali następujące referaty:

1. *Zastosowanie syntezy częstotliwości do praktycznej realizacji jednostki długości w GUM* – Dariusz Czułek i Robert Szumski.
2. *Nowe stanowisko państwowego wzorca jednostki kąta płaskiego* – Katarzyna Nicińska i Joanna Przybylska.
3. *Porównania międzylaboratoryjne wzorców wielkości elektrycznych* – Edyta Dudek, Michał Mosiądz i Lidia Snopek.
4. *Odtwarzanie jednostki indukcyjności na podstawie pojemności elektrycznej oraz automatycznych komparacji wzorców indukcyjności z wykorzystaniem komparatora RLC* – Jolanta Jursza, Maciej Koszarny i Robert Rzepakowski.
5. *Niejednoznaczność udziału rozdzielczości w niepewności wyniku pomiaru* – Albin Czubla, Jan Stępniewski i Krzysztof Lenarczyk.
6. *Dokładność w pomiarach temperatury* – Elżbieta Grudniewicz.
7. *Nowe podejście dotyczące wyrażania niepewności pomiaru w dokumentach Międzynarodowego Biura Miar* – Paweł Fotowicz.

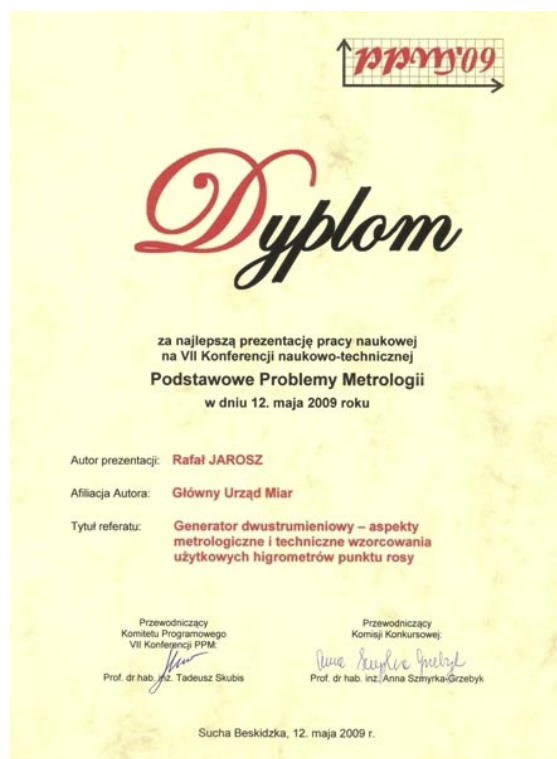
3. VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Podstawowe Problemy Metrologii”

W dniach 10 – 13 maja 2009 r. w hotelu Monti, w Suchoej Beskidzkiej odbyła się VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Podstawowe Problemy Metrologii”, zorganizowana przez Katedrę Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej oraz wydawnictwo *Pomiary Automatyka Kontrola*.

Uczestniczyło w niej środowisko metrologiczne z całego kraju. Główny Urząd Miar reprezentowany był przez Wiceprezesa Głównego Urzędu Miar, Pana Włodzimierza Popiołka oraz dr. Albina Czuble i Rafała Jarosza. Pracownicy GUM wygłosili dwa referaty:

1. *Podstawowe modele pomiaru stosowane przy wzorcowaniu w metrologii elektrycznej i metrologii czasu i częstotliwości* – Albin Czubla, Edyta Dudek, Robert Rzepakowski, Marcin Orzepowski, Grzegorz Kościacz i Łukasz Usydus; referat został wygłoszony przez dr. Albina Czuble.
2. *Generator dwustrumieniowy – aspekty metrologiczne i techniczne wzorcowania użytkowych higrometrów punktu rosy*; referat był wygłoszony przez Rafała Jarosza.

Wystąpienie Pana Rafała Jarosza zostało uhonorowane dyplomem za najlepszą prezentację pracy naukowej na VII Konferencji Naukowo-Technicznej *Podstawowe Problemy Metrologii*.



W Konferencji tej wzięli również udział pracownicy Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi pod przewodnictwem Pana Dyrektora Piotra Nowakowskiego. Przedstawiono następujące referaty:

1. *Zmiany w polskiej administracji miar* – Piotr Nowakowski i Izabela Klich.
2. *Wzorcowanie narzędzi dynamometrycznych* – Roman Jędrzejewski.
3. *Wzorcowanie mierników do pomiaru poziomego wysokości napełnienia zbiorników* – Marek Musioł.
4. *Chemiczne materiały odniesienia* – Henryka Szewczyk.
5. *Niepewność pomiaru przy kontroli metrologicznej wodomierzy* – Paweł Sikorski.
6. *Pomiary wilgotności względnej i temperatury powietrza* – Elżbieta Gradowska i Robert Jendrys.

4. XLI Międzyuczelniana Konferencja Metrologów

Konferencja odbyła się w dniach 31 sierpnia – 2 września 2009 r. w Gdańsku.

W konferencji wzięło udział 62 uczestników, ogłoszono 49 referatów. Główny Urząd Miar reprezentowała Pani Dominika Kosińska, która wygłosiła referat pt. *Wytwarzanie, certyfikacja i szacowanie niepewności zawartości składników syntetycznego gazu ziemnego*, autorstwa Dominiki Kosińskiej i Dariusza Ciecior.

5. Spalskie Warsztaty Energetyczne

Spotkanie miało miejsce w dniach 23 – 24 kwietnia 2009 r. w Spale.

Pracownicy Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi uczestniczyli w „Spalskich Warsztatach Energetycznych”. Przedstawili oni prezentacje:

1. *Wprowadzenie. Krótka charakterystyka Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi* – Piotr Nowakowski.
2. *Liczniki energii elektrycznej czynnej prądu przemiennego* – Mirosław Kaźmierski.
3. *Ogólne informacje dotyczące gazomierzy, ciepłomierzy do wody oraz wodomierzy* – Paweł Sikorski.

6. V Konferencja Naukowo-Techniczna techników oprogramowania gazu dziś i jutro TOP GAZ

Konferencja ta odbyła się w dniach 21 – 23 września 2009 r. w Rogowie.

Pracownicy Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi zaprezentowali następujące referaty:

1. *Organizacja służby miar w Polsce. Zadania Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi* – Piotr Nowakowski.
2. *Wzorce odniesienia jednostki objętości gazu ciekłego propan-butan* – Paweł Sikorski.

Opracowała Dobrosława Sochocka

Wydawca: **Główny Urząd Miar**

Prezes

JANINA MARIA POPOWSKA

tel. 581 95 45, fax 620 84 11,

e-mail: prjp@gum.gov.pl

**Wiceprezes odpowiedzialny za sprawę
metrologii naukowej**

WŁODZIMIERZ POPIOŁEK

tel. 581 95 49, fax 620 84 11, e-mail: vprwp@gum.gov.pl

**Wiceprezes odpowiedzialny za sprawę
metrologii prawnej**

DOROTA HABICH

tel. 581 93 26, fax 624 25 73,

e-mail: vprdh@gum.gov.pl

Dyrektor Generalny Urzędu

ELŻBIETA SOIKA

tel. 581 93 78, fax 624 02 68, e-mail: dgu@gum.gov.pl

Redakcja: **Stanowisko ds. Koordynacji Współpracy Naukowej**

Dobrosława Sochocka tel. (22) 581 92 93, e-mail: d.suchocka@gum.gov.pl

Paweł Fotowicz tel. (22) 581 94 37, e-mail: uncert@gum.gov.pl