

W świecie metrologii akustycznej

In acoustic metrology world

O historii metrologii akustycznej, wzorcach ciśnienia akustycznego, przyrządach i metodach pomiarowych, a także o perspektywach rozwoju akustyki w GUM rozmawiamy z dr inż. Danutą Dobrowolską, kierownikiem Laboratorium Akustyki GUM.

The GUM Bulletin talks to dr Danuta Dobrowolska, the head of Acoustic Laboratory. The main topics of the interview are: the history of acoustic metrology, the acoustic pressure standards, the instruments and the measurement methods, as well as the prospects of acoustic development as a metrology area in polish NMI.

Red. Biuletynu GUM: – Zaczniemy od historii. Od kiedy możemy mówić o pomiarach w akustyce? Kiedy pojawiły się pierwsze wzorce i jak zmieniały się na przestrzeni lat?

Danuta Dobrowolska: – Akustyka, jako nauka zajmująca się powstawaniem i propagacją fal akustycznych, a także ich oddziaływaniem na człowieka, jest najstarszą dziedziną fizyki. Już w starożytności wykorzystywano zjawiska akustyczne do uzyskiwania dobrych warunków słyszalności w amfiteatrach, budowano instrumenty muzyczne. Potrzeba wykonywania pomiarów akustycznych pojawiła się wraz z szybkim rozwojem przemysłu, motoryzacji, transportu kolejowego i lotniczego po zakończeniu II wojny światowej. Towarzyszył temu coraz większy hałas na stanowiskach pracy i w środowisku naturalnym, coraz większe grupy ludzi były narażone na jego uciążliwe, a nawet szkodliwe oddziaływanie. Podjęto szerokie badania dotyczące oddziaływania hałasu na nasz słuch i ustalenia wartości dopuszczalnych. Konieczne było wykonywanie pomiarów i podejmowanie działań mających na celu ograniczenie hałasu. Skonstruowano pierwszy pojemnościowy mikrofon pomiarowy, opracowano miernik poziomu dźwięku, a zatem zaistniała potrzeba jego kalibracji i sprawdzania, budowy wzorców i zapewnienia spójności pomiarowej w akustyce. Metoda odtwarzania jednostki ciśnienia akustycznego, co może zaskakiwać, nie zmieniła się na przestrzeni lat. Nadal jest to metoda wzajemności, o której więcej powiem za chwilę. Natomiast ogromna zmiana technologiczna dokonała



się w aparaturze pomiarowej służącej do przetwarzania i analizy sygnałów, wliczając w to automatyzację pomiarów.

– A kiedy GUM rozpoczął działalność metrologiczną w dziedzinie akustyki?

– Na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, w ówczesnym Polskim Komitecie Normalizacji i Miar utworzono dwa laboratoria: Laboratorium Pomiarów Akustycznych i Laboratorium Pomiarów Drgań Mechanicznych. Do ich powstania bardzo przyczynili się dwaj polscy naukowcy: nieżyjący już prof. Zbigniew Engel z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i prof. Adam Lipowczan z Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach. Obaj prowadzili zaawansowane badania naukowe dotyczące zagrożeń hałasem i drganiami w przemyśle. Obserwowali narastającą liczbę pracowników z trwałym ubytkiem

słuchu wskutek długotrwałego przebywania w środowisku pracy, w którym hałas przekraczał wartości dopuszczalne. Była to w tamtych latach choroba numer jeden na liście chorób zawodowych. Ci dwaj naukowcy przekonali ówczesne władze państwowe, żeby objąć kontrolą metrologiczną przyrządy pomiarowe do pomiaru hałasu i stworzyć laboratorium pomiarów akustycznych i pomiarów drgań w ówczesnym PKNiM. Co ciekawe, zanim laboratoria otrzymały odpowiednie wyposażenie i rozpoczęły działalność, legalizacja mierników poziomu dźwięku była wykonywana w upoważnionych laboratoriach AGH i GIG.

– Jak Laboratorium Pomiarów Akustycznych było umiejscowione w ówczesnej strukturze PKNiM?

– Z tego, co pamiętam, Laboratorium Pomiarów Akustycznych wchodziło w skład Zakładu Elektroniki, natomiast Laboratorium Pomiarów Drgań Mechanicznych było w Zakładzie Masy i Siły. Trwało to aż do momentu reaktywowania Głównego Urzędu Miar, kiedy powstało Samodzielne Laboratorium Akustyki i Drgań z dwiema pracowniami: akustyki i drgań. W kolejnych latach Laboratorium dotykały liczne przekształcenia, w pewnym momencie zostało podzielone ponownie na dwa oddzielne laboratoria, aby ostatecznie powrócić do jednego, z dwiema pracowniami odpowiedzialnymi w GUM za metrologię akustyczną i drgań mechanicznych. Należy podkreślić, że taka struktura odzwierciedla strukturę spotykaną w organizacjach międzynarodowych. Zarówno właściwy Komitet Doradczy – CCAUV CIPM, jak i Komitet Techniczny TC-AUV EURAMET, obejmują akustykę (A), ultradźwięki i akustykę podwodną (U) oraz drgania (V).

– Hałas kojarzymy z decybelami...

– Tak, mierzymy poziom ciśnienia akustycznego wyrażony w decybelach. Ale musimy pamiętać, że jednostką ciśnienia akustycznego, podobnie jak ciśnienia statycznego, jest paskal (Pa). Ucho młodego, zdrowego człowieka może zarejestrować dźwięk o ciśnieniu 20 mikropaskali (μPa). Jest to tzw. próg słyszenia. Jednocześnie przeciętne ucho ludzkie może bez natychmiastowego uszkodzenia odebrać dźwięk o ciśnieniu ok. 100 paskali, a więc pięć milionów razy większym niż próg słyszenia. Taki hałas wytwarzają np. samoloty odrzutowe. Górna granica ciśnienia

akustycznego, powyżej której następuje nieodwracalne uszkodzenie słuchu (przerwanie błony bębenkowej) to ok. 200 Pa (140 dB). Hałas o takiej wartości ciśnienia akustycznego może towarzyszyć działalności wojskowej, dodatkowo często ma charakter impulsowy, dlatego tak ważna jest ochrona słuchu żołnierzy.

Ucho ludzkie odbiera więc dźwięki o olbrzymiej rozpiętości amplitudy i trudno sobie wyobrazić przyrząd, który miałby tak duży zakres pomiarowy. Ponadto ucho ludzkie ma taką właściwość, że reaguje na względne zmiany ciśnienia akustycznego. To wszystko sprawiło, że ciśnienie akustyczne jest wyrażane w mierze logarytmicznej, w dB w odniesieniu do 20 mPa.

– A jaki byłby wynik pomiaru poziomu dźwięku tu, w pomieszczeniu, gdzie jest względnie cicho i docierają do nas tylko słabe odgłosy z zewnątrz budynku i z korytarza?

– Hałas w typowym pomieszczeniu biurowym to 40–50 dB, o 10 dB mniej można zmierzyć w bibliotece, gdzie z zasady panuje cisza. Należy zaznaczyć, że podane wartości dotyczą poziomu dźwięku skorygowanego zgodnie ze znormalizowaną charakterystyką A miernika poziomu dźwięku, odpowiadającą przeciętnej charakterystyce częstotliwościowej słuchu człowieka. Poziom nieskorygowanego ciśnienia akustycznego byłby większy.

– Proszę powiedzieć, jak wytwarzany jest dźwięk w warunkach laboratoryjnych, w jak najszerszym zakresie, od bardzo słabo słyszalnego, po odpowiadający hukowi startującego samolotu.

– Nie ma potrzeby wytwarzania w laboratorium dźwięków o tak szerokim zakresie poziomu, byłoby to z resztą technicznie niezwykle trudne. Do kalibracji przyrządów akustycznych, akustycznych torów pomiarowych, a nawet do wzorcowania mikrofonów roboczych służy kalibrator, wytwarzający sygnał akustyczny o określonej częstotliwości (lub wielu częstotliwościach, tzw. kalibrator wieloczęstotliwościowy) i określonym poziomie lub poziomach ciśnienia akustycznego wybieranych z szeregu 94 dB, 104 dB i 114 dB. Najczęściej stosowane są kalibratory wytwarzające sygnał o częstotliwości 1 kHz i poziomie 94 dB, czyli ciśnieniu akustycznym 1 Pa. Specyficznym

kalibratorem jest pistonfon – mechaniczne, tłokowe źródło dźwięku, wytwarzające sygnał o częstotliwości 250 Hz i poziomie 124 dB. Wzorcowanie przyrządu za pomocą kalibratora, obejmujące również jego regulację, jest szybkim sposobem powiązania wyników uzyskiwanych za pomocą tego przyrządu z wzorcem pierwotnym ciśnienia akustycznego i upewnienia się, że wielkość mierzona jest rzeczywiście wyrażona w dB, w odniesieniu do 20 mPa. Przyrząd wzorcujemy przy jednej wartości poziomu i najczęściej jednej częstotliwości, zatem nasuwa się pytanie, skąd mamy pewność, że przyrząd mierzy poprawnie w całym zakresie poziomu i w całym zakresie częstotliwości? Ponadto, czy właściwie mierzy zarówno sygnały ustalone, jak i impulsowe? Otóż istnieje ustalony międzynarodowo program badań typu i program badań okresowych przyrządów, w czasie których sprawdza się jego różne charakterystyki metrologiczne za pomocą sygnałów elektrycznych, doprowadzonych do wejścia poprzez układ zastępczy symulujący warunki obciążenia mikrofonem, po odłączeniu mikrofonu od przyrządu. Wyniki badań są oceniane pod kątem zgodności z wymaganiami dla przyrządów akustycznych, określonymi w normach międzynarodowych. Uznaje się, że przyrząd wywzorcowany za pomocą kalibratora akustycznego bezpośrednio przed pomiarem i spełniający wymagania właściwej normy poprawnie mierzy poziom dźwięku, a wyniki uzyskane za jego pomocą są porównywalne.

Odrębną grupę przyrządów akustycznych stanowią audiometry tonowe stosowane do badania słuchu, które są swoistymi generatorami tonów o ustalonych częstotliwościach (tzw. audiometrycznych) i regulowanych wartościach poziomu słyszenia w zakresie odpowiadającym zakresowi słyszenia człowieka. Wzorcowanie i regulacja audiometru dotyczy pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego tonów oraz szumów maskujących. Czynności te wymagają zastosowania specjalnych wzorców – układu symulatora ucha wyposażonego w mikrofon wzorcowy, powiązanego z wzorcem pierwotnym ciśnienia akustycznego oraz, co może zaskakiwać – sprzęgacza mechanicznego z przetwornikiem drgań mechanicznych, tzw. sztucznego mastoidu, powiązanego z wzorcem pierwotnym wielkości drgań mechanicznych, stosowanego przy wzorcowaniu audiometrów w torze przewodnictwa kostnego. Należy zauważyć, że przy uszkodzonym uchu zewnętrznym sygnał akustyczny



można doprowadzić do ucha wewnętrznego poprzez drgania kości czaszki.

Zarówno układ sztucznego ucha, jak i sztuczny mastoid wymagają regularnego wzorcowania polegającego na wyznaczeniu ich czułości w funkcji częstotliwości oraz impedancji odpowiednio akustycznej lub mechanicznej, a także oceny zgodności wyznaczonych impedancji z wymaganiami określonymi we właściwej normie.

– Jak zatem wygląda hierarchia wzorcowań w dziedzinie akustyki?

– Wzorec pierwotny, który jest początkiem spójności pomiarowej w dziedzinie akustyki, stanowią trzy laboratoryjne mikrofony wzorcowe o średnicy jednego cala (klasa LS1) albo trzy laboratoryjne mikrofony wzorcowe o średnicy pół cala (klasa LS2), wzorcowane metodą wzajemności: mikrofony LS1 w zakresie częstotliwości 2 Hz–10 kHz i mikrofony LS2 w zakresie 2 Hz–25 kHz. Zgodnie z właściwą normą międzynarodową pomiary są wykonywane na stanowisku pomiarowym sterowanym komputerowo. Niżej w hierarchii stoją wzorce wtórne – mikrofony robocze, symulatory ucha oraz kalibratory. Mikrofony robocze (klasa WS1, WS2 i WS3) mogą być wzorcowane metodą porównania jednoczesnego z mikrofonem klasy LS2, w sprzęgaczu aktywnym, w zakresie częstotliwości od 20 Hz do około 2 kHz lub za pomocą pistonfonu, przy jednej częstotliwości. Dodatkowo wyznacza się wtedy względną charakterystykę częstotliwościową mikrofonu za pomocą tzw. pobudnika elektrostatycznego, z uwzględnieniem poprawek dla pola swobodnego określonych przez producenta dla danego typu mikrofonu. Kalibratory są wzorcowane za pomocą mikrofonu klasy LS lub WS, albo metodą porównawczą z innym wzorcowanym kalibratorem.

O wzorcowaniu sztucznego ucha wspominałam już wcześniej.

Na samym dole hierarchii wzorcowań znajdują się przyrządy użytkowe: mierniki poziomu dźwięku, zarówno w zakresie słyszalnym, jak też infra- i ultradźwiękowym, indywidualne mierniki ekspozycji na dźwięk, analizatory dźwięku w pasmach tercjowych i oktaowych (inaczej mówiąc mierniki poziomu dźwięku z filtrami pasmowymi), audiometry. O wzorcowaniu, sprawdzaniu i ocenie zgodności z wymaganiami już mówiłam.

– Powróćmy do wzorca pierwotnego ciśnienia akustycznego. Dlaczego tworzą go akurat trzy mikrofony?

– Jak już wspominałam nie ma możliwości technicznych budowy materialnego wzorca ciśnienia akustycznego w bardzo szerokim zakresie amplitudy i częstotliwości. Budowane są wzorce tłokowe, tzw. pistonfony laserowe, ale wytwarzają one sygnał akustyczny w zakresie małych częstotliwości i w ograniczonym zakresie poziomu. Tymczasem w naszym otoczeniu słyszymy dźwięki o częstotliwości od 20 Hz do 20 kHz i zakresie poziomu do 130 dB. W związku z tym, jednostkę ciśnienia akustycznego (paskal) wytwarza się metodą pośrednią. Jest to znana powszechnie – nie tylko w akustyce – metoda wzajemności.

Metoda wzajemności umożliwia wyznaczenie czułości mikrofonów bez potrzeby odniesienia do jakiegokolwiek wielkości akustycznej, a wymaga jedynie pomiaru kilku wielkości fizycznych, takich jak napięcie elektryczne, impedancja elektryczna, długość, ciśnienie statyczne, temperatura i wilgotność. Metoda wymaga użycia trzech mikrofonów, będących przetwornikami odwracalnymi oraz spełniającymi zasadę wzajemności, łączonych ze sobą kolejno parami w taki sposób, aby podczas całego cyklu pomiarowego każdy z wzorcowanych mikrofonów działał zarówno jako źródło, jak i jako odbiornik sygnału akustycznego. Podczas wzorcowania wyznacza się elektryczną i akustyczną impedancję przeniesienia układu elektroakustycznego, składającego się z dwóch mikrofonów połączonych sprzęgaczem wypełnionym gazem. Elektryczna impedancja przeniesienia układu jest wyznaczana pomiarowo przez porównanie z impedancją wzorcową włączoną szeregowo z mikrofonem nadawczym. Impedancja akustyczna

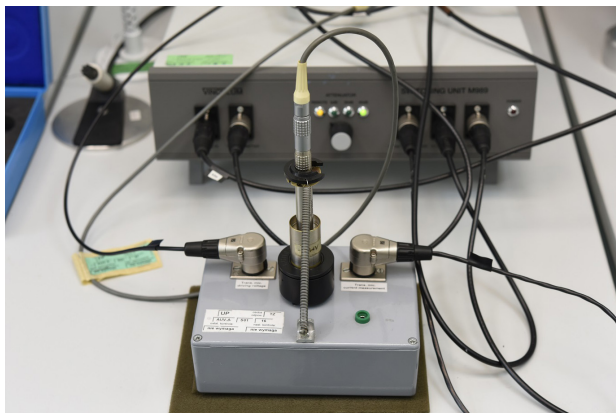
przeniesienia jest natomiast wyznaczana dla określonej pary mikrofonów obliczeniowo, na podstawie zmierzonej geometrycznej objętości sprzęgacza, wyznaczonych impedancji akustycznych każdego z mikrofonów, z uwzględnieniem wpływu temperatury i ciśnienia statycznego, a także częstotliwości sygnału akustycznego, wpływu przewodzenia ciepła oraz rozkładu przestrzennego ciśnienia akustycznego w sprzęgaczu. Iloraz modułu elektrycznej impedancji przeniesienia i modułu akustycznej impedancji przeniesienia tego układu jest równy iloczynowi czułości mikrofonów połączonych sprzęgaczem. Podczas wzorcowania dla każdej pary mikrofonów wyznaczone są kolejno iloczyny ich skuteczności. Rozwiązując następnie układ trzech równań z trzema niewiadomymi uzyskuje się wartość czułości w warunkach ciśnieniowych każdego z trzech wzorcowanych mikrofonów.

– Czy wszędzie na świecie jednostkę ciśnienia akustycznego odtwarza się w taki sposób?

– Tak, wszędzie jest stosowana metoda wzajemności, opisana w normie międzynarodowej IEC, przyjętej jako norma europejska i polska. Podejmowane są próby opracowania metod wzorcowania mikrofonów z wykorzystaniem technik laserowych, ale niepewność tych metod wciąż nie jest satysfakcjonująca. Metoda wzajemności pozostaje nadal jedyną metodą zalecaną przez Komitet Doradczy ds. Akustyki, Ultradźwięków i Drgań do stosowania przy porównaniach kluczowych.

– Na ustanowienie wzorca ciśnienia akustycznego wzorcem państwowym trzeba było długo czekać. Abstrahując od nieznanych nam powodów, dla których tak długo to trwało, proszę powiedzieć, jakie znaczenie ma ta decyzja?

– Ta decyzja ma charakter formalny. Nie zmieniła ona jakości wzorca, która była potwierdzona wielokrotnie w porównaniach kluczowych, począwszy od 1999 r., a jedynie podniosła jego rangę w Polsce. Jest to po prostu urealnienie sytuacji. GUM jest od 2004 r. członkiem Komitetu Doradczego ds. Akustyki, Ultradźwięków i Drgań i jako członek bierze udział w porównaniach CIPM dotyczących wzorców państwowych. A więc wzorzec ciśnienia akustycznego GUM był na forum międzynarodowym traktowany



jak wzorzec państwowy. Nie wiem dokładnie, jak wygląda polityka dotycząca wzorców państwowych w innych NMI i czy są jakieś prawne uregulowania z tym związane. Nie chcę też oceniać, dlaczego u nas trwało to tak długo. Moim zdaniem nie powinno być żadnych przeciwwskazań dla uznania za wzorzec państwowy wzorca pierwotnego utrzymywanego w GUM, jeżeli jego właściwości zostały potwierdzone w porównaniach kluczowych. Merytorycznie wzorzec ciśnienia akustycznego od dawna miał taki status.

– O każdy wzorzec trzeba dbać, poddawać go konserwacji. Jakiego rodzaju zabiegi są prowadzone przy wzorcu ciśnienia akustycznego?

– Wzorzec państwowy ciśnienia akustycznego to, jak już mówiłam, układ pomiarowy do wzorcowania mikrofonów metodą wzajemności oraz dwie triady laboratoryjnych mikrofonów wzorcowych klasy LS1 i LS2. Aparatura elektroniczna stosowana do pomiarów nie wymaga specjalnych zabiegów, a jedynie wzorcowania w ustalonych odstępach czasu. Można ją bez problemu wymienić, o czym świadczy modernizacja stanowiska wzorca przeprowadzona w 2009 r. Najważniejszym elementem wzorca, świadczącym o jego stabilności i jakości, są laboratoryjne mikrofony wzorcowe. W tej chwili mamy zgromadzonych kilkanaście sztuk mikrofonów, które są regularnie, co pół roku, wzorcowane. Wyniki wzorcowania są monitorowane i analizowane, a każdy mikrofon ma swoją historię. Na podstawie wieloletniej obserwacji możemy powiedzieć, że mikrofony są bardzo stabilne. Świadczy to również o stabilności całego stanowiska, jak też o wysokich kompetencjach personelu. Pierwszym opiekunem stanowiska wzorca państwowego ciśnienia akustycznego był Tomasz Zmierzak,

a od kilku lat wzorcem opiekuje się Mirosław Wiater.

Należy w tym miejscu podkreślić, że praca z mikrofonami wymaga dużego opanowania, ostrożności i dużej kultury pracy. Membranę mikrofonu w postaci cienkiej folii o grubości ułamka milimetra jest bardzo łatwo uszkodzić. A koszt jednego mikrofonu to około 25 tys. zł. Mikrofony wzorcowe powinny być przechowywane w ustabilizowanych warunkach termicznych, najlepiej w oryginalnych pudełkach, bez ekspozycji na kurz, który może wpłynąć na czułość mikrofonu. Mikrofony wzorcowe GUM są przechowywane w pomieszczeniu klimatyzowanym, gdzie zarówno temperatura, jak i wilgotność są utrzymywane w granicach określonych w normie.

– Czy w przypadku wzorca GUM, warunki jego utrzymania są optymalne, czy może niezbędne byłyby jakieś udoskonalenia?

– Przy pomiarach w zakresie małych częstotliwości, poniżej 20 Hz, obserwowany był wpływ drgań mechanicznych przenoszonych przez konstrukcję budynku na powtarzalność wyników. Aby ograniczyć wpływ drgań zakupiliśmy w tym roku stół laboratoryjny z aktywną wibroizolacją. Wstępne badania wykazały zauważalną poprawę powtarzalności wyników, szczególnie dotyczących pomiaru fazy. Należy również wspomnieć, że wskutek położenia budynku GUM w centrum Warszawy, jesteśmy narażeni na zakłócenia związane z różnymi źródłami promieniowania elektromagnetycznego, ale na to nie mamy wpływu.

– Czy są jakieś projekty międzynarodowe, bądź innowacyjne prace badawcze w dziedzinie akustyki, o których moglibyśmy powiedzieć?

– Wzorzec GUM brał udział praktycznie we wszystkich światowych porównaniach kluczowych, organizowanych przez Międzynarodowy Komitet Miar CIPM. GUM bierze również udział w porównaniach regionalnych, szczególnie COOMET, ponieważ tej organizacji zawsze brakuje NMI do linkowania.

Jeśli chodzi o przyszłość, to stoją przed nami co najmniej dwa wyzwania. Pierwsze to udoskonalenie metody wzorcowania mikrofonów roboczych w zakresie częstotliwości infradźwiękowych metodą porównawczą. W tej chwili jesteśmy w stanie wzorcować laboratoryjne mikrofony wzorcowe w zakresie częstotliwości od 2 Hz. Ale użytkownik stosuje do pomiarów mikrofony robocze, które powinny być wzorcowane metodą porównawczą z mikrofonami laboratoryjnymi. Stosowane dotychczas stanowisko do wzorcowania mikrofonów w zakresie częstotliwości infradźwiękowych wymaga udoskonalenia i powiązania z wzorcem państwowym.

Drugim wyzwaniem jest doskonalenie metod wzorcowania symulatorów ucha i sprzęgaczy mechanicznych stosowanych w audiometrii. Kilka lat temu weszła w życie norma, która wymaga wyznaczenia zarówno charakterystyki częstotliwościowej, jak też impedancji akustycznej sztucznego ucha. Ponadto modernizacji wymaga aparatura stosowana dotychczas do wzorcowania tych przyrządów. Pierwszy krok został już zrobiony. Laboratorium zakupiło nowoczesny czterokanałowy analizator z generatorem wraz

z oprogramowaniem specjalistycznym umożliwiającym tworzenie stosownych procedur.

Mam też nadzieję, że jesteśmy w przededniu powstania w GUM Pracowni Ultradźwięków. W ramach programu EMPIR i wezwania Research Potential zgłosiłam projekt dotyczący stworzenia w GUM możliwości pomiarowych i badawczych w dziedzinie ultradźwięków. W budżecie na przyszły rok mamy zarezerwowane środki na zakup podstawowego wyposażenia i przewidziane zatrudnienie pracownika. To zatrudnienie będzie związane z kilkumiesięcznym szkoleniem w instytutach metrologicznych w Wielkiej Brytanii i Turcji, ponieważ kraje te mają spore osiągnięcia w dziedzinie ultradźwięków. Stworzenie infrastruktury metrologicznej w dziedzinie ultradźwięków w GUM będzie miało znaczenie dla każdego z nas. Czyż nie byliśmy przynajmniej raz w życiu poddani badaniom ultrasonograficznym? Coraz częściej dzieje się to już w okresie prenatalnym. A aparatura ultrasonograficzna w Polsce nie jest kontrolowana.

Ponadto, nawiązałam kontakt z ekspertami z Zakładu Ultradźwięków Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, prowadzącymi badania w dziedzinie ultradźwięków. Mam nadzieję, że współpraca z zagranicznymi NMI oraz z IPPT PAN zaowocuje rozwojem metrologii ultradźwięków w GUM.

– Redakcja Biuletynu GUM serdecznie Pani tego życzy i dziękuje za rozmowę.