

Anna Iżewska*

NIEPEWNOŚĆ POMIARÓW IZOLACYJNOŚCI AKUSTYCZNEJ PRZEGRÓD BUDOWLANYCH I ICH ELEMENTÓW

Norma PN-EN ISO/IEC 17025:2005 *Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących* wprowadza konieczność wyznaczania niepewności pomiarów, aby mogły one być rzetelne i porównywalne. Podstawowe zasady wykonywania obliczeń są podane w Przewodniku GUM [1]. Jednakże wątpliwości, jak zwykle bywa, pojawiają się wówczas, gdy przechodzimy do szczegółów. W niniejszym artykule przedstawiono kilka przykładów budżetu niepewności, określonej dla wyników badań izolacyjności akustycznej przeprowadzonych według norm z serii EN ISO 140 [2], a ponadto omówiono problemy związane z wyznaczaniem niepewności jednolicebnowych wskaźników oceny stosowanych w akustyce budowlanej.

1. Wprowadzenie

Izolacyjność akustyczna elementów budowlanych nie jest mierzona bezpośrednio, lecz wyznaczana z zależności funkcyjnej zwanej równaniem pomiaru:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

Równaniu temu, wyrażającemu fizyczne zależności pomiędzy wielkościami mierzonymi a wyznaczaną wartością parametru akustycznego (mezurandu Y), powinna towarzyszyć niepewność wyznaczenia wartości Y , wynikająca z niepewności poszczególnych wielkości bezpośrednio mierzonych $x_1, x_2 \dots x_n$, będących estymatami $X_1, X_2, \dots X_n$.

Składniki niepewności (każdy z nich reprezentowany przez odchylenie standardowe, zwane niepewnością standardową $u(x_i)$ lub krótko u_i) są kategoryzowane w zależności od metody ich wyznaczenia. Istnieją dwie takie metody:

- metoda typu A, wykorzystująca metody statystyczne, polegające na przykład na wyznaczeniu odchylenia standardowego dla serii pomiarów $s(x_i)$; w takim przypadku niepewność standardowa wynosi $u(x_i) = s(x_i)$,
- metoda typu B, posługująca się informacjami uzyskanymi a priori, na przykład na podstawie świadectw przyrządów pomiarowych oraz typu rozkładu statystycznego.

* dr – Zakład Akustyki ITB

Odchylenie standardowe estymaty wyniku pomiaru y , zwane niepewnością standardową złożoną $u_c(y)$, wyznaczone jest na podstawie poszczególnych niepewności standardowych $u(x_i)$, przy zastosowaniu powszechnie znanej w statystyce metody kwadratów, zgodnie z zależnością:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

i obliczeniu pierwiastka kwadratowego z otrzymanego rezultatu.

Równanie (2) zwane jest prawem propagacji niepewności, a pochodne cząstkowe $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ są często nazywane współczynnikami wrażliwości.

Miarą niepewności, definiującą przedział wartości, w której z zadaniem poziomem ufności znajdzie się wyznaczana z równania pomiaru wartość Y (mezurand Y), jest tzw. niepewność rozszerzona U . Oznacza ona, że wartość Y , której estymatą jest y , będzie przy zadanym poziomie ufności należeć do przedziału $y - U \leq Y \leq y + U$.

Wartość niepewności rozszerzonej wyznacza się, mnożąc niepewność standardową złożoną przez współczynnik rozszerzenia niepewności k , zależny od rodzaju rozkładu statystycznego i założonego poziomu ufności k (najczęściej przyjmuje się, że $k = 95\%$)

$$U(Y) = k u_c(y) \quad (3)$$

Rodzaj prawdopodobieństwa można tradycyjnie przypisać metodą a priori lub starać się go określić na podstawie rozkładów wartości wejściowych $x_1 \dots x_n$, zgodnie z zasadą propagacji rozkładów [1]:

$$y = c_1 x_1 + \dots + c_N x_N \quad (4)$$

gdzie x_i są wielkościami wejściowymi, a c_i – współczynnikami wrażliwości.

Wielkości wejściowe charakteryzują się (niekiedy różnymi) rozkładami prawdopodobieństwa, takimi jak rozkład normalny, Studenta, prostokątny czy trójkątny.

Przybliżeniem wielokrotnego spłotu rozkładów normalnych i prostokątnych jest rozkład PN.

Dla wielkości wyjściowej Y , której rozkład jest spłotem wielu różnych rozkładów (normalnego, Studenta, prostokątnego), niepewność rozszerzoną można estymować zależnością

$$U(Y) = k_{PN} \hat{u}'_c(y) \quad (5)$$

gdzie: k_{PN} – współczynnik rozszerzenia dla rozkładu typu PN, odczytany z tablicy 1 [2],

\hat{u}'_c – niepewność złożona z N wielkości wejściowych, wyrażona wzorem

$$\hat{u}'_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{t_i(y)}{k_N} u_i(y) \right)^2} \quad (6)$$

gdzie: $t_i(v)$ – kwantyl rozkładu Studenta z liczbą stopni swobody $v = n - 1$, dla i -tej wielkości wejściowej,
 k_N – współczynnik rozszerzenia rozkładu normalnego ($k_N = 1,96$ dla $p = 95\%$).

Można przyjąć, że dla wszystkich wielkości wejściowych nie mających rozkładu Studenta przyjmuje się współczynnik rozszerzenia dla rozkładu normalnego, tzn.

$$t_i(v) = k_N \quad (7)$$

2. Parametry mające wpływ na niepewność wyniku pomiaru izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – przykłady budżetów niepewności

Jak już wspomniano, pomiar izolacyjności akustycznej nie jest pomiarem bezpośrednim, lecz jego wynik oblicza się na podstawie innych mierzonych wielkości, a mianowicie:

- 1) poziomu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym (lub w laboratorium, w komorze nadawczej),
- 2) poziomu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym (lub w komorze odbiorczej),
- 3) czasu pogłosu w pomieszczeniu odbiorczym (lub w komorze odbiorczej),
- 4) powierzchni badanej próbki (z wyjątkiem wyznaczania izolacyjności za pomocą znormalizowanej lub standardowej różnicy poziomów),
- 5) objętości pomieszczenia odbiorczego (komory odbiorczej).

Analiza budżetów niepewności wyników pomiarów izolacyjności akustycznej wykonywanych różnymi metodami prowadzi do wniosku, że największy wpływ na niepewność wyznaczania izolacyjności akustycznej ma niepewność pomiaru ciśnienia akustycznego L_f (zależna od niepewności analizatora $u(L_{ana})$) oraz niepewności wyznaczenia poprawek dla mikrofonu δL_{mik} oraz kalibratora δL_{kal} , obliczanych na podstawie świadectw wzorcowania, w których podawane są niepewności $U(\delta L_{kal})$ i $U(\delta L_{mik})$, określone dla rozkładu normalnego z poziomem ufności 95%.

W przypadku wykonywania pomiarów w n stacjonarnych punktach pomiarowych standardowa niepewność pomiaru $u(L_{ana})$ (odczytanej wartości poziomu ciśnienia akustycznego dla częstotliwości f jest równa eksperymentalnemu odchyleniu standardowemu serii n pomiarów. Ponieważ składowa ta, z rozkładem Studenta, ma dominujący udział w budżecie niepewności, niepewność rozszerzoną wyznacza się ze wzoru

$$U(L_f) = k_{n-1,95\%} \cdot u_c(L_f) \quad (8)$$

W pomiarach laboratoryjnych, wykonywanych z zastosowaniem mikrofonu obrotowego, odczytywana wartość poziomu ciśnienia akustycznego podczas jednego cyklu uwzględnia zmienność pola akustycznego w czasie i przestrzeni. Eksperymentalne odchylenie standardowe w każdym z pasm częstotliwości jest o wiele mniejsze niż niepewność rozszerzona $U(L_{ana})$, deklarowana przez producenta analizatora.

Wszystkie składowe budżetu niepewności w całym zakresie częstotliwości pomiarowych mają rozkład normalny, dlatego też niepewność rozszerzona $U(L_f)$ wynosi

$$U(L_f) = k_{N, 95\%} \cdot u_c(L_f) \quad (9)$$

Czas pogłosu mierzony jest dla każdego pasma częstotliwości w n punktach pomieszczenia (lub komory badawczej). Estymatą wyniku pomiaru jest wartość średnia T_f . W takim przypadku niepewność standardowa dla wartości średniej T_f jest równa eksperymentalnemu odchyleniu standardowemu średniej z serii n niezależnych pomiarów $T_{f,i=1, \dots, n}$.

$$u(T_f) = s(\bar{T}_f) = \frac{s(T_{f,i})}{\sqrt{n}}, \quad s \quad (10)$$

Ponieważ liczba punktów pomiarowych jest stosunkowo mała (najczęściej $n = 6$), zakłada się, że jest to rozkład Studenta, z $n - 1$ stopniami swobody.

$$U(T_f) = k_{n-1, 95\%} \cdot u_c(T_f) \quad (11)$$

Niepewności wyznaczania pola powierzchni badanej próbki oraz objętości pomieszczenia odbiorczego (komory odbiorczej) określa się, zakładając rozkład prostokątny, z odpowiednim kwantem rozdzielczości i granicą rozdzielczości. Analiza budżetów niepewności dla izolacyjności akustycznej wykazała jednak, że udział tych czynników ma znikomy wpływ na niepewność całkowitą wyniku pomiaru.

Poniżej przedstawiono przykłady budżetów niepewności wyznaczania izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych, dotyczące pomiarów przeprowadzonych w laboratorium (wg PN EN 20140-3:1999 [3]) i w terenie (wg PN EN ISO 140-4:2000 [3]).

W obu przypadkach prawo propagacji niepewności ma postać

$$u^2(R_f) = \left(\frac{\partial R_f}{\partial L_{1f}}\right)^2 u^2(L_{1f}) + \left(\frac{\partial R_f}{\partial L_{2f}}\right)^2 u^2(L_{2f}) + \left(\frac{\partial R_f}{\partial T_f}\right)^2 u^2(T_f) + \left(\frac{\partial R_f}{\partial S}\right)^2 u^2(S) + \left(\frac{\partial R_f}{\partial V}\right)^2 u^2(V) \quad (12)$$

przy czym odpowiednie współczynniki wrażliwości wynoszą

$$\frac{\partial R_f}{\partial L_{1f}} = 1; \quad \frac{\partial R_f}{\partial L_{2f}} = -1; \quad \frac{\partial R_f}{\partial T_f} = \frac{10 \log e}{T_f}; \quad \frac{\partial R_f}{\partial S} = \frac{10 \log e}{S}; \quad \frac{\partial R_f}{\partial V} = -\frac{10 \log e}{V} \quad (13)$$

Różnica polega na przyjęciu innych założeń dotyczących typu rozkładu prawdopodobieństwa dla składowych L_{1f} i L_{2f} .

W tabeli 1 podano przykład budżetu niepewności wyznaczania izolacyjności akustycznej właściwej w laboratorium, a w tabeli 2 – przykład budżetu niepewności wyznaczania izolacyjności akustycznej przybliżonej w terenie.

Tablica 1. Przykład budżetu niepewności wyznaczania izolacyjności akustycznej właściwej (w laboratorium)

Table 1. Example of the uncertainty budget for sound reduction index (in laboratory)

Symbol wielkości	Estymata	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości	Udział niepewności
L_{1f}	98,1	0,186 dB	normalny	1	0,186 dB
L_{2f}	67,2	0,186 dB	normalny	1	0,186 dB
T_f	2,34	0,0716 s	Studenta	1,856	0,133 dB
S	2,25	0,0029 m ²	prostokątny	1,930	0,006 dB
V	54	0,2887 m ³	prostokątny	0,080	0,023 dB
R_f	28,7	$u_c(R_f) = 0,296$ dB $U(R_f) = 0,62$ dB			

Tablica 2. Przykład budżetu niepewności wyznaczania izolacyjności akustycznej przybliżonej (w terenie, liczba punktów pomiarowych $n = 6$)

Table 2. Example of the uncertainty budget for apparent sound reduction index (in situ, number of measurement points $n = 6$)

Symbol wielkości	Estymata	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości	Udział niepewności
L_{1f}	107,2	0,291 dB	Studenta	1	0,291 dB
L_{2f}	65,2	0,291 dB	Studenta	1	0,291 dB
T_f	1,85	0,032 s	Studenta	2,348	0,074 dB
S	10,1	0,0029 m ²	prostokątny	0,458	0,001 dB
V	83,2	0,2887 m ³	prostokątny	0,052	0,015 dB
R_f	43,1	$u_c(R'_f) = 0,418$ dB $U(R'_f) = 1,07$ dB			

3. Metody określania niepewności wyznaczania jednolicebnych wskaźników oceny izolacyjności akustycznej

Zagadnienie wyznaczania niepewności jednolicebnych wskaźników oceny akustycznej przegród budowlanych lub ich elementów jest obecnie przedmiotem prac prowadzonych przez grupę roboczą ISO/TC43/SC2/WG18/AHG2. Ostateczne opracowanie nowej normy dotyczącej niepewności pomiarów w akustyce budowlanej, która ma zastąpić istniejącą EN ISO 140-2, napotyka na wiele trudności ze względu na stopień

skomplikowania zagadnienia, spowodowany specyfiką pomiarów akustycznych, a także obowiązującą dotychczas metodyką wyznaczania tzw. jednoliczbowych wskaźników oceny zgodnie z serią norm EN ISO 717 [4] (dokładność wyznaczania wskaźników jest nieadekwatna do dokładności obliczania niepewności pomiarów przeprowadzanych w pasmach tercjowych, na podstawie których wskaźniki te są wyznaczone).

Przy określaniu dopuszczalnych wartości niepewności rozróżnia się trzy sytuacje:

- sytuacja A – pomiary laboratoryjne są przeprowadzane przez różne laboratoria na tej samej (lub identycznej) próbce; w tym przypadku wyznaczana jest „odtwarzalność” wyników pomiaru, określana na podstawie testów międzylaboratoryjnych, służąca do oceny właściwości akustycznej wyrobu;
- sytuacja B – pomiary terenowe są wykonywane przez różne laboratoria w tym samym pomieszczeniu i dotyczą właściwości akustycznych tego samego elementu; podobnie jak w sytuacji A „odtwarzalność” jest wyznaczana na podstawie testów międzylaboratoryjnych (dotychczas w normie EN ISO 140-2 nie były podane wartości „odtwarzalności” dla takich przypadków);
- sytuacja C – pomiary laboratoryjne są przeprowadzane przez to samo laboratorium, przez ten sam zespół, z zastosowaniem tej samej aparatury, na tej samej próbce; w tym przypadku wyznaczana jest „powtarzalność” wyników pomiaru.

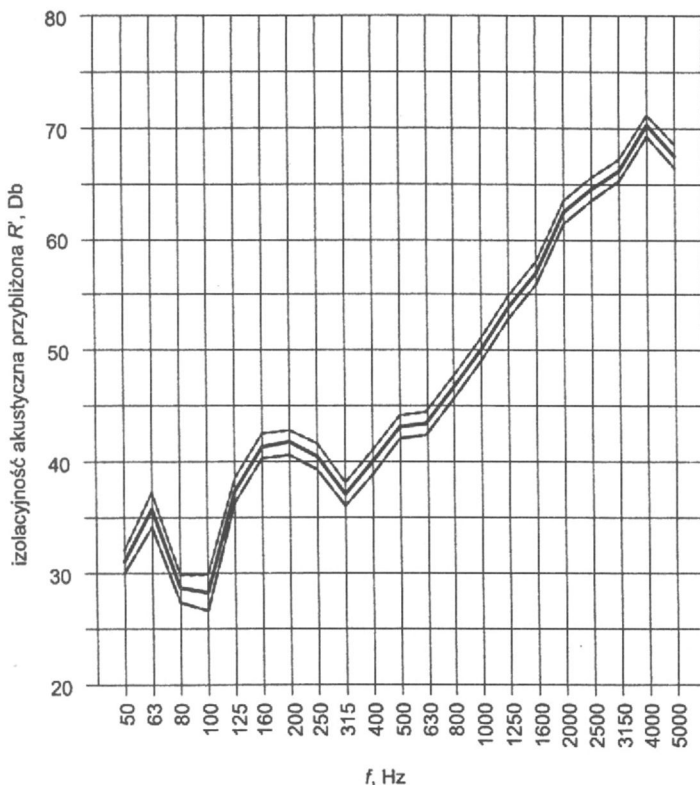
Szczególne znaczenie ma niepewność wyznaczana w „sytuacji A” (różne laboratoria, ta sama próbka), czyli tzw. odtwarzalność wyników pomiaru, gdyż stanowi ona istotną informację przy znakowaniu wyrobów budowlanych znakiem CE. Obecnie ze względu na stosunkowo duże różnice w wynikach pomiarów przeprowadzanych przez różne laboratoria trudno jest porównywać jakość akustyczną podobnych wyrobów występujących na rynku europejskim.

Poza tym wartości odtwarzalności wyników pomiarów wykorzystanych przy obliczaniu wskaźników jednoliczbowych zależą nie tylko od dokładności metod badawczych, ale także od rodzaju próbek (okna, szyby, ściany masywne, ściany lekkie, stropy, podłogi itp.). Wymaga to zatem przeprowadzenia szeregu badań międzylaboratoryjnych, poprzedzonych przygotowaniem bardzo szczegółowych procedur badawczych, opisujących warunki przeprowadzania pomiarów i montażu próbek. Prace z tym związane będą trwały przez kilka najbliższych lat.

Ze względu na fakt, że laboratoria akredytowane powinny znać niepewność wykonywanych pomiarów, w Zakładzie Akustyki ITB opracowano metodę pozwalającą na określenie niepewności pomiaru izolacyjności akustycznej przegród budowlanych, odnoszącą się do pojedynczego pomiaru, a więc charakteryzującą dane laboratorium. Proponowana metoda opiera się na przyjęciu założenia, że skoro do każdego wyniku pomiaru X_f w konkretnym pasmie częstotliwości f (gdzie X jest jednym z parametrów izolacyjności akustycznej) przypisana jest niepewność rozszerzona $U(X_f)$, to niepewność wyznaczenia odpowiedniego wskaźnika oceny może być określona na podstawie charakterystyk $X_f + U(X_f)$ i $X_f - U(X_f)$. Przykład tak wyznaczonych charakterystyk przedstawiono na rysunku 1.

Analiza przeprowadzonych zgodnie z tą metodą obliczeń prowadzi do wniosku, że ze względu na obowiązującą obecnie metodę wyznaczania wskaźników oceny, tak określona niepewność mieści się w granicach dokładności wyznaczania wskaźnika, tzn.

wynosi ± 1 dB. Użycie tej metody będzie bardziej uzasadnione po przeprowadzeniu rewizji serii norm EN ISO 717, polegającej na zmianie metod wyznaczania wskaźników oceny (zwiększenie dokładności do 0,1 dB).



Rys. 1. Charakterystyki izolacyjności akustycznej przybliżonej: R'_f , $[R'_f + U(R'_f)]$ i $[R'_f - U(R'_f)]$
 Fig. 1. Characteristics of apparent sound reduction index R'_f , $[R'_f + U(R'_f)]$ i $[R'_f - U(R'_f)]$

4. Podsumowanie

Określenie niepewności wyników pomiarów jest bardzo istotnym czynnikiem jakości pomiarów. Dlatego oprócz równania pomiaru określającego zależności pomiędzy parametrami fizycznymi należy również podawać niepewność końcowego wyniku badania.

Analizując budżet niepewności dla każdego pasma częstotliwości pomiarowej, można określić czynniki mające największy wpływ na niepewność wyniku pomiaru izolacyjności akustycznej i podjąć ewentualne działania zmierzające do ich zminimalizowania, takie jak na przykład zwiększenie równomierności rozkładu natężenia pola akustycznego w komorach badawczych, zmiana usytuowania punktów pomiarowych.

Metody wyznaczania niepewności jednoliczbowych wskaźników oceny izolacyjności akustycznej przegród lub ich elementów są o wiele bardziej skomplikowane. Najwię-

kszym problemem jest wyznaczenie odtwarzalności wyników, zależy ona bowiem nie tylko od dokładności stosowanych metod badawczych, ale także od rodzaju próbek (okna, szyby, ściany lekkie, ściany masywne, stropy itd.). Wymaga to przeprowadzenia szeregu badań międzylaboratoryjnych, co będzie trwało z pewnością kilka najbliższych lat.

Bibliografia

- [1] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik GUM, Warszawa 1999
- [2] Fotowicz P.: Obliczanie niepewności rozszerzonej metodą analityczną opartą na splocie rozkładów wielkości wejściowych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 1, 2005
- [3] Seria norm EN ISO 140 Akustyka – Pomiary izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych. Część 3: Pomiary laboratoryjne izolacyjności od dźwięków powietrznych elementów budowlanych. Część 4: Pomiary terenowe izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych między pomieszczeniami
- [4] Seria norm EN ISO 717 Akustyka – Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i elementów budowlanych. Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych. Część 2: Izolacyjność od dźwięków uderzeniowych

MEASUREMENT UNCERTAINTY OF SOUND INSULATION OF BUILDING PARTITIONS AND THEIR ELEMENTS

Summary

The standard PN-EN ISO/IEC 17025:2005 *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* introduces the necessity of evaluation of measurement uncertainties for making them reliable and comparable. The general principles of calculations are presented in the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [1]. However, as usually, the questions appear when we go into details. In this paper, the author presents several examples of uncertainty budget, evaluated for the measurement results of the sound insulation (carried out according to the series of standards EN ISO 140 [2]). The problems referred to the uncertainty of single-number indices used in building acoustics are also presented.

Praca wpłynęła do Redakcji 23 XII 2009 r.