Witold Mikulski

Metoda pomiarowo-obliczeniowa określania skuteczności ochrony akustycznej obudów dźwiękoizolacyjnych źródeł w zakresie częstotliwości 20 – 40 kHz

Warszawa 2018

CIOP PIB

Materiały informacyjne CIOP-PIB
Metoda pomiarowo-obliczeniowa określania skuteczności ochrony akustycznej obudów dźwiękoizolacyjnych źródeł w zakresie częstotliwości 20 – 40 kHz

Opracowano na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy" sfinansowanego w latach 2017-2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Zrealizowano w ramach 2 etapu (2018) zadania 3.G.02 Badanie emisji energii akustycznej, przemysłowych, kierunkowych, technologicznych źródeł hałasu ultradźwiękowego o dużej mocy akustycznej oraz badania skuteczności akustycznej obudów dźwiękoizolacyjnych dla tych źródeł.

Autor:
dr inż. Witold Mikulski – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

© Copyright by
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2018

CIOP PIB
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (48-22) 623 36 98, www.ciop.pl

Opisano metodę pomiarowo-obliczeniową określania skuteczności ochrony akustycznej obudów dźwiękoizolacyjnych źródeł w zakresie częstotliwości 20 – 40 kHz. Wielkościami określającymi skuteczność obudów są izolacyjność akustyczna mocowa oraz izolacyjność akustyczna ciśnieniowa. Wyznacza się je z pomiarów poziomu mocy akustycznej i poziomu ciśnienia akustycznego emisji źródła wzorcowego: bez obudowy i w obudowie. Właściwości obudów określa się w zakresie częstotliwości 20 – 40 kHz. Dzięki metodzie będzie możliwa ocena akustyczna obudów i elementów obudów, która umożliwi odpowiednie ich zastosowanie w urządzeniach emitujących hałas ultradźwiękowy.

Wstęp

Metoda określania skuteczności ochrony akustycznej obudów dźwiękoizolacyjnych źródeł w zakresie częstotliwości 20 – 40 kHz polega na pomiarowo-obliczeniowym określeniu dwóch wielkości akustycznych: izolacyjności akustycznej mocowej $D_{w,f}$ oraz izolacyjności akustycznej ciśnieniowej $D_{p,f}$. Wyznacza się je z pomiarów mocy akustycznej i poziomu ciśnienia akustycznego emisji źródła wzorcowego. Pomiary przeprowadza się metodą tłumienia wtrącenia (tj. poprzez pomiar tych wielkości: bez obudowy i w obudowie). W pomiarach wykorzystuje się specjalne źródło wzorcowe. Właściwości obudów określa się w zakresie częstotliwości 20 – 40 kHz (dotychczas określało się właściwości dźwiękoizolacyjne obudów w zakresie częstotliwości do 10 kHz). Dzięki metodzie będzie możliwa ocena akustyczna obudów i elementów obudów, która umożliwi efektywne ich stosowanie dla urządzeń emitujących hałas ultradźwiękowy.

Metoda pomiarowo-obliczeniowa określania izolacyjności akustycznej mocowej w zakresie częstotliwości 20 – 40 kHz

Izolacyjność akustyczną mocową określa się na podstawie różnicy wartości zmierzonych poziomu mocy akustycznej laboratoryjnego wzorcowego źródła dźwięku: bez obudowy i w obudowie. Źródło dźwięku umieszcza się na powierzchni odbijającej, a pomiar poziomu mocy akustycznej przeprowadza się poprzez pomiar ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej półkuli nad powierzchnią odbijającą. Zaleca się, aby promień półkuli pomiarowej *r* był równy 1 m.

Izolacyjność akustyczną mocową obudowy $D_{w,f}$, w tercjowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej *f*, oblicza się, w dB, na podstawie wzoru:

$$
\begin{aligned}
&D_{w,f} = \\
&= L_{w,\text{bez obudowy},f} - L_{w,\text{w obudowie},f} = \\
&= \overline{L'_{p,\text{bez obudowy},f}} - K_{1\text{w,bez obudowy},f} - K_{2,f} + 10 \cdot \log(S) + K_{air,f} \\
&\qquad - \left(\overline{L'_{p,\text{w obudowie},f}} - K_{1\text{w,w obudowie},f} - K_{2,f} + 10 \cdot \log(S) + K_{air,f}\right) = \\
&\qquad = \overline{L'_{p,\text{bez obudowy},f}} - K_{1\text{w,bez obudowy},f} - \left(\overline{L'_{p,\text{w obudowie},f}} - K_{1\text{w,w obudowie},f}\right) = \\
&= \overline{L'_{p,\text{bez obudowy},f}} - \overline{L'_{p,\text{w obudowie},f}} + K_{1\text{w,w obudowie},f}
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

gdzie:

$L_{w,\text{bez obudowy},f}$, $L_{w,\text{w obudowie},f}$ – poziom mocy akustycznej, odpowiednio bez obudowy i w obudowie, w dB,

$\overline{L'_{p,\text{bez obudowy},f}}$, $\overline{L'_{p,\text{w obudowie},f}}$ – średni poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej, odpowiednio bez obudowy i w obudowie, w dB,

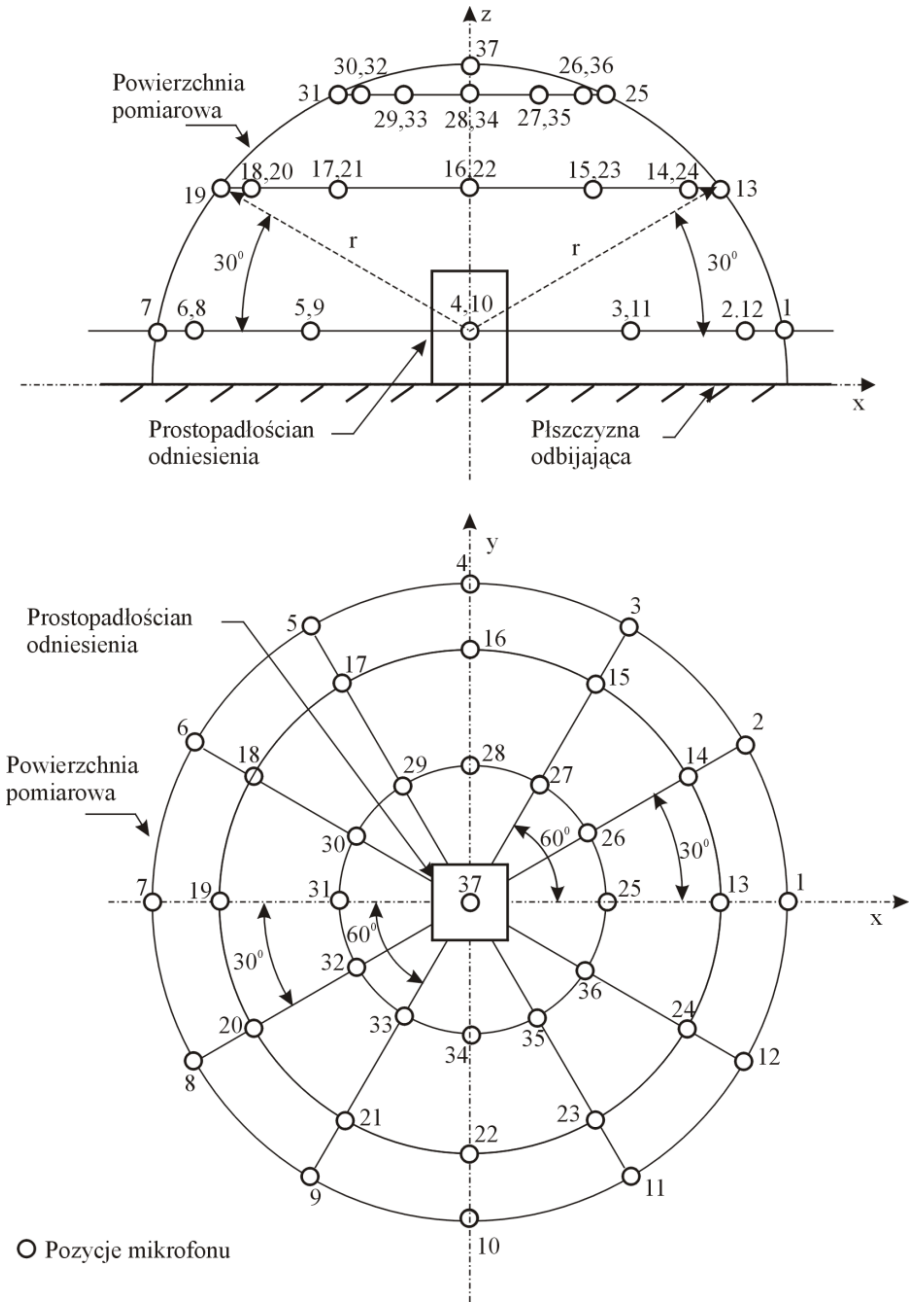
$K_{1\text{w,bez obudowy},f}$, $K_{1\text{w,w obudowie},f}$ – poprawki uwzględniające hałas tła, odpowiednio bez obudowy i w obudowie, w dB (ponieważ, w badanym pomieszczeniu, różnica średniego poziomu ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej od dźwięku źródła i tła akustycznego w rozpatrywanych pasmach częstotliwości, w przypadku pomiarów bez obudowy przekraczała 15 dB, to $K_{1\text{w,bez obudowy},f} \approx 0$),

$K_{2,f}$ – poprawka środowiskowa, (mimo że poprawka $K_{2,f}$ nie jest istotna z punktu widzenia wyznaczanych wartości parametrów określających izolacyjność akustyczną, to określa się ją w celu tzw. kwalifikacji środowiska do wykonania badań), w dB,

S – pole powierzchni pomiarowej, w m^2.

Indeks *f* (w całym tekście) oznacza, że daną wielkość określa się dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej: 20; 25; 31,5 i 40 kHz.

Liczba punktów pomiarowych, w których mierzy się poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej, nie może być mniejsza niż 37. Dla tej liczby punkty pomiarowe można rozmieścić co 30° zarówno w płaszczyźnie poziomej, jak i pionowej (rys. 1.).



Rys. 1. Położenie 37 punktów pomiarowych na powierzchni pomiarowej półkuli

Średni poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej, oblicza się, w dB, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f*, na podstawie wzoru:

$$\overline{L_{p,f}} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 10^{0,1 \cdot L_{p,i,f}}\right) \qquad (2)$$

gdzie:

n – liczba punktów pomiarowych,

$L_{p,i,f}$ – poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej w punkcie o numerze *i*, w dB (dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f*).

Poprawkę uwzględniającą hałas tła, $K_{1w,f}$, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f*, oblicza się, w dB, na podstawie wzoru:

$$K_{1w,f} = -10 \cdot \log_{10}\left(1 - 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{p,f}}\right) \qquad (3)$$

gdzie:

$$\Delta L_{p,f} = \overline{L_{p,zr,f}} - \overline{L_{p,\text{tło},f}} \qquad (4)$$

$\overline{L_{p,\text{zr},f}}$ – średnia wartość poziomu ciśnienia akustycznego, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f,* na powierzchni pomiarowej, podczas gdy źródło dźwięku emituje dźwięk, w dB,

$\overline{L_{p,\text{tło},f}}$ – średnia wartość poziomu ciśnienia akustycznego, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f,* na powierzchni pomiarowej, gdy źródło dźwięku nie emituje dźwięku, w dB.

Jeżeli $\Delta L_{p,f}$ > 15 dB, należy przyjąć, że poprawka $K_{1w,f}$ jest równa zero i można pominąć poprawkę związaną z hałasem tła (jest ona pomijalnie mała).

Dla 3 dB ≤ $\Delta L_{p,f}$ ≤ 15 dB należy poprawkę $K_{1w,f}$ uwzględnić w obliczeniach.

Dla $\Delta L_{p,f}$ < 3 dB nie można wystarczająco dokładnie uwzględnić wpływu tła akustycznego. W celu zwiększenia wartości tej różnicy należy: albo przybliżyć powierzchnię pomiarową do źródła dźwięku, albo zmniejszyć hałas tła akustycznego.

Reasumując, ze wzoru (1) wynika, że do określenia izolacyjności akustycznej mocowej wystarczy określenie średnich poziomów ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej (dla źródła w obudowie i bez obudowy) oraz określenie poprawki $K_{1w,\text{w obudowie},f}$, tj. dla źródła w obudowie.

W końcowej wersji wzoru (1) nie ma poprawki $K_{2,f}$ (wyruguje się w obliczeniach). Jednakże, w celu zapewnienia, że pomiary przeprowadza się w warunkach, gdy energia akustyczna bezpośrednio docierająca ze źródła dźwięku znacznie przekracza energię fal odbitych, wartości tej

poprawki powinny być mniejsze niż 4 dB ($K_{2,f} \leq 4$ dB, analogicznie jak w normie PN-EN ISO 9295:2015-09). W przypadku, gdy niespełnione są warunki środowiska badawczego (za duża wartość poprawki $K_{2,f}$, tzn. $K_{2,f} > 4$ dB), promień r powierzchni pomiarowej należy zmniejszyć poniżej zalecanego 1 m, ale z zastrzeżeniem, że $r \geq 2d_0$ (d_0 – przekątna prostopadłościanu obudowy) oraz $r \geq 0{,}5$ m.

Poprawkę środowiskową $K_{2,f}$, w pomieszczeniach dla półkulistej powierzchni pomiarowej, oblicza się, w dB, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f,* na podstawie wzoru:

$$K_{2,f} = 10 \cdot \log_{10}\left(1 + 4\frac{S}{A_f}\right) \qquad (5)$$

gdzie:

S – pole powierzchni pomiarowej, w metrach kwadratowych (dla półkulistej powierzchni pomiarowej o promieniu r, $S = 2\pi r^2$), w m^2,

A_f – chłonność akustyczna pomieszczenia, którą oblicza się, w m^2, dla częstotliwości f, Na podstawie wzoru:

$$A_f = 0{,}16\frac{V}{T_f} \qquad (6)$$

gdzie:

V – objętość pomieszczenia badawczego, w m^3,

T_f – czas pogłosu pomieszczenia, dla częstotliwości f, w sekundach.

Z tego wynika, że poprawkę środowiskową dla półkulistej powierzchni pomiarowej o promieniu r, $K_{2,f}$, oblicza się dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f,* w dB, na podstawie wzoru:

$$K_{2,f} = 10 \cdot \log_{10}\left(1 + 4\frac{S}{A_f}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(1 + 24{,}8\frac{S \cdot T_f}{V}\right) \approx 10 \cdot \log_{10}\left(1 + 156\frac{r \cdot T_f}{V}\right) \qquad (7)$$

Oznaczenia jak we wzorze 6.

Normy związane:

- PN-EN ISO 11546-2:2010 Akustyka — Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości obudów — Część 2: Pomiary w warunkach terenowych.
- PN-EN ISO 15667:2004 Akustyka — Wytyczne dotyczące ograniczania hałasu przez obudowy i kabiny.
- PN-EN ISO 3744:2011 Akustyka — Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego — Metody techniczne stosowane w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk.

- PN-EN ISO 3746:2011 Akustyka — Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego — Metoda orientacyjna z zastosowaniem otaczającej powierzchni pomiarowej nad płaszczyzną odbijającą dźwięk.
- PN-EN ISO 9295:2015-09 Akustyka — Wyznaczanie poziomów mocy hałasu wysokiej częstotliwości emitowanego przez maszyny i urządzenia.

Metoda pomiarowo-obliczeniowa określania izolacyjności akustycznej ciśnieniowej w zakresie częstotliwości 20 – 40 kHz

Izolacyjność akustyczną ciśnieniową określa się na podstawie różnicy wartości zmierzonych poziomów ciśnienia akustycznego emisji laboratoryjnego wzorcowego źródła dźwięku: bez obudowy i w obudowie. Źródło dźwięku umieszcza się na powierzchni specjalnego stolika pomiarowego (rys. 2.), a pomiar poziomu ciśnienia akustycznego przeprowadza się na stanowisku pracy i/lub w punkcie odniesienia. Dla jednoznaczności wyników pomiarów zaleca się przyjąć punkt odniesienia na wysokości 1,5 m nad podłogą, nad krawędzią stołu pomiarowego. Wówczas otrzyma się wartość izolacyjności akustycznej ciśnieniowej: na stanowisku pracy i/lub w punkcie odniesienia.

Rys. 2. Stolik pomiarowy wg serii norm PN-EN ISO 11200

Izolacyjność akustyczną ciśnieniową obudowy $D_{p,f}$, w tercjowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej *f*, oblicza się, w dB, na podstawie wzoru:

$$D_{p,f} =$$
$$= L_{p,\text{bez obudowy},f} - L_{p,\text{w obudowie},f} =$$
$$= L'_{p,\text{bez obudowy},f} - K_{1\text{p,bez obudowy},f} - K_{3,f} - \left(L'_{p,\text{w obudowie},f} - K_{1\text{p,w obudowie},f} - K_{3,f}\right) =$$
$$= L'_{p,\text{bez obudowy},f} - K_{1\text{p,bez obudowy},f} - \left(L'_{p,\text{w obudowie},f} - K_{1\text{p,w obudowie},f}\right) =$$
$$= L'_{p,\text{bez obudowy},f} - L'_{p,\text{w obudowie},f} + K_{1\text{p,w obudowie},f} \quad (8)$$

gdzie:

$L_{p,\text{bez obudowy},f}$, $L_{p,\text{w obudowie},f}$ – poziom ciśnienia akustycznego emisji, odpowiednio bez obudowy i w obudowie, w dB,

$L'_{p,\text{bez obudowy}}$, $L'_{p,\text{w obudowie}}$ – poziom ciśnienia akustycznego zmierzony, odpowiednio bez obudowy i w obudowie, w rozpatrywanych pasmach częstotliwości, w dB,

$K_{1\text{p,bez obudowy},f}$, $K_{1\text{p,w obudowie},f}$ – poprawki uwzględniające hałas tła, odpowiednio bez obudowy i w obudowie (ponieważ, w badanym pomieszczeniu, różnica poziomu ciśnienia akustycznego w określonym miejscu od dźwięku źródła i od dźwięku tła akustycznego w rozpatrywanych pasmach częstotliwości, w przypadku pomiarów bez obudowy przekraczała 15 dB, to $K_{1\text{p,bez obudowy},f} \approx 0$), w dB,

$K_{3,f}$ – poprawka środowiskowa, w dB (mimo że poprawka $K_{3,f}$ nie jest istotna z punktu widzenia wyznaczanych wartości określanych parametrów, to określa się ją w celu tzw. kwalifikacji środowiska do wykonanych badań).

Indeks *f* (w całym tekście) oznacza, że daną wielkość określa się dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej: 20; 25; 31,5 i 40 kHz.

Poprawkę uwzględniającą hałas tła, $K_{1\text{p},f}$, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f*, oblicza się, w dB, na podstawie wzoru:

$$K_{1\text{p},f} = -10 \cdot \log_{10}\left(1 - 10^{-0{,}1 \cdot \Delta L_{p,f}}\right) \quad (9)$$

gdzie:

$$\Delta L_{p,f} = L'_{p,f} - L''_{p,f} \quad (10)$$

$L'_{p,f}$ – poziom ciśnienia akustycznego, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f*, gdy źródło dźwięku emituje dźwięk, w dB,

$L''_{p,f}$ – poziom ciśnienia akustycznego, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f*, gdy źródło dźwięku nie emituje dźwięku, w dB,

Jeżeli $\Delta L_{p,f} > 15$ dB, należy przyjąć, że $K_{1p,f}$ jest równa zero, tj. nie uwzględniać poprawki związanej z hałasem tła (jest pomijalnie mała).

Dla 3 dB ≤ $\Delta L_{p,f}$ ≤ 15 dB należy poprawkę $K_{1p,f}$ uwzględnić w obliczeniach.

Dla $\Delta L_{p,f} < 3$ dB nie można wystarczająco dokładnie uwzględnić wpływu tła akustycznego. W celu zwiększenia wartości tej różnicy należy zmniejszyć hałas tła akustycznego.

Reasumując, ze wzoru (8) wynika, że do określenia izolacyjności akustycznej ciśnieniowej wystarczy określenie poziomów ciśnienia akustycznego w punkcie odniesienia (dla źródła w obudowie i bez obudowy) oraz określenie poprawki $K_{1p,\text{w obudowie},f}$, tj. dla źródła w obudowie.

W końcowej wersji wzoru (8) nie ma poprawki $K_{3,f}$ (wyruguje się w obliczeniach). Jednakże, w celu zapewnienia, że pomiary przeprowadza się w warunkach, gdy energia akustyczna bezpośrednio docierająca ze źródła dźwięku znacznie przekracza energię fal odbitych, wartości tej poprawki powinny być mniejsze niż 2 dB ($K_{3,f}$ ≤ 2 dB, analogicznie jak w normie PN-EN ISO 11201).

Poprawkę środowiskową, $K_{3,f}$, w pomieszczeniach, oblicza się, w dB, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f,* na podstawie wzoru:

$$K_{3,f} = 10 \cdot \log_{10}\left(1 + 4\frac{S}{A_f}\right) \qquad (11)$$

gdzie:

$S = 2\pi d^2$, w m^2,

d – odległość stanowiska pracy od środka źródła dźwięku, w metrach,

A_f – chłonność akustyczna pomieszczenia, oblicza się, w m^2, dla częstotliwości f, na podstawie wzoru:

$$A_f = 0{,}16\frac{V}{T_f} \qquad (12)$$

gdzie:

V – objętość pomieszczenia badawczego, w m^3,

T_f – czas pogłosu pomieszczenia, dla częstotliwości f, w sekundach.

Z tego wynika, że poprawkę środowiskową, $K_{3,f}$, oblicza się, w dB, dla tercjowego pasma częstotliwości o częstotliwości środkowej *f,* na podstawie wzoru:

$$K_{3,f} = 10 \cdot \log_{10}\left(1 + 4\frac{S}{A_f}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(1 + 24{,}8\frac{S \cdot T_f}{V}\right) \approx 10 \cdot \log_{10}\left(1 + 156\frac{d \cdot T_f}{V}\right) \qquad (13)$$

Oznaczenia jak we wzorze 12.

Normy związane:

- PN-EN ISO 11546-2:2010 Akustyka — Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości obudów — Część 2: Pomiary w warunkach terenowych.
- PN-EN ISO 15667:2004 Akustyka — Wytyczne dotyczące ograniczania hałasu przez obudowy i kabiny.
- PN-EN ISO 11201:2012 Akustyka — Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia — Wyznaczanie poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk z pomijalnymi poprawkami środowiskowymi.
- PN-EN ISO 11202: 2012 Akustyka — Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia — Wyznaczanie poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach z zastosowaniem przybliżonych poprawek środowiskowych.