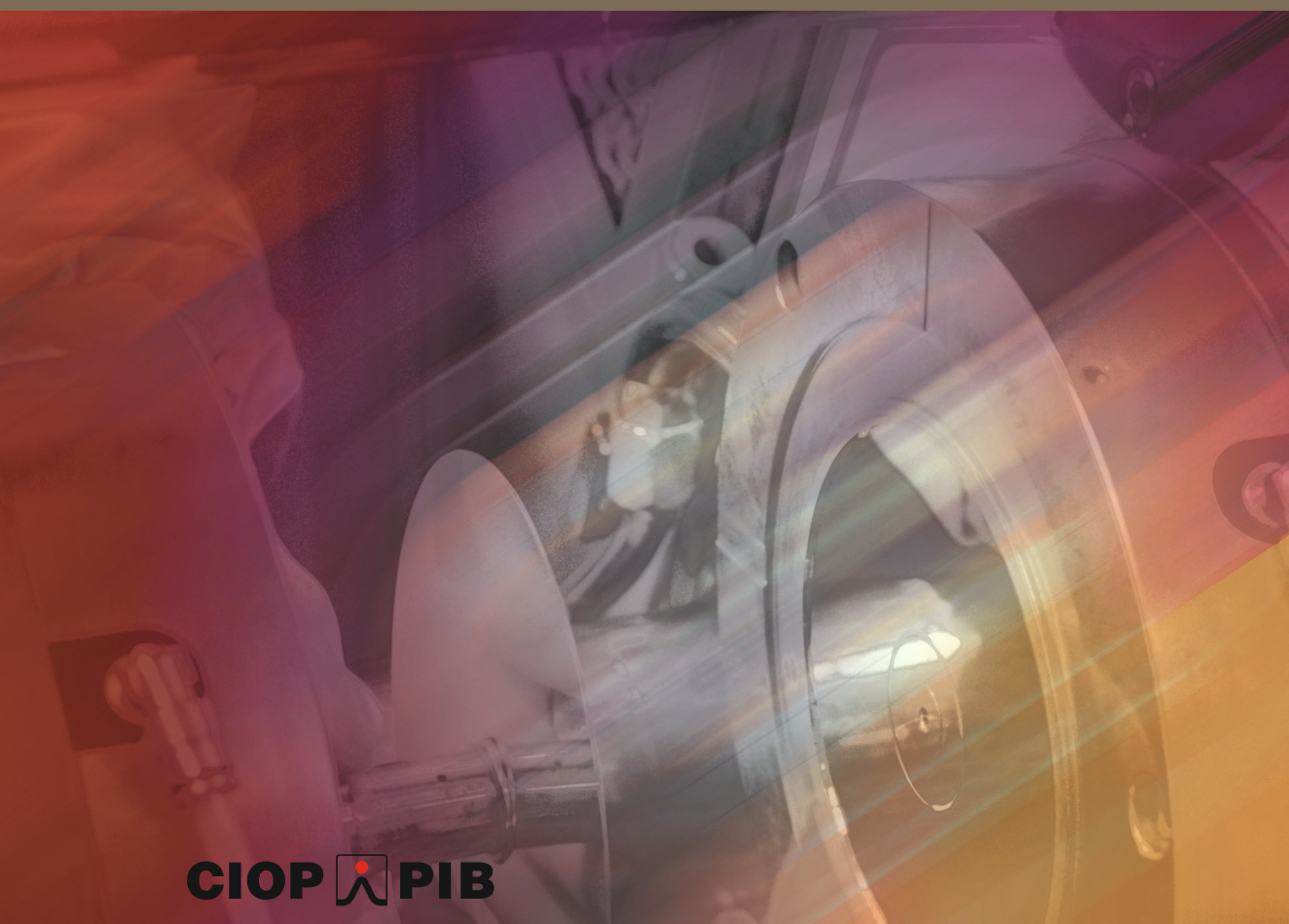
JAKOŚĆ AKUSTYCZNA MASZYN

Dariusz Pleban



CIOP PIB

Jakość akustyczna maszyn

Dariusz Pleban

Jakość akustyczna maszyn

Warszawa 2012

CIOP PIB

Dyrektor Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego prof. dr hab. med. Danuta Koradecka

Niniejsza monografia jest rezultatem badań przeprowadzonych w ramach Programu Wieloletniego pn. „Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów Unii Europejskiej" oraz Programu Wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy", koordynowanych przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Opiniodawcy
– prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Engel
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
– dr hab. inż. Wiktor Marek Zawieska, prof. nadzw. CIOP-PIB
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autor
dr inż. Dariusz Pleban
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Projekt okładki
Anna Antoniszewska

Skład i łamanie
Anna Borkowska

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2012

ISBN 978-83-7373-129-5

CIOP PIB

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (22) 623 36 98, fax (22) 623 36 93, 623 36 95, www.ciop.pl

Serdecznie dziękuję wszystkim, którzy przyczynili się do powstania niniejszej pracy.

Szczególne słowa podziękowania kieruję do ***Pani prof. dr hab. med. Danuty Koradeckiej*** za umożliwienie wykonania tej pracy na podstawie badań naukowych zrealizowanych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym. ***Panu prof. zw. dr. hab. Zbigniewowi Engelowi***, mojemu Wielkiemu Nauczycielowi i Patronowi mojego rozwoju naukowego, dziękuję za twórcze inspirowanie, motywację i nieocenioną pomoc merytoryczną.

Podziękowania składam także ***Panom dr. inż. Grzegorzowi Makarewiczowi, dr. inż. Januszowi Piechowiczowi i dr. inż. Lesławowi Stryczniewiczowi*** za merytoryczną współpracę i pomoc w przeprowadzeniu eksperymentów o istotnym znaczeniu dla tej pracy.

Dariusz Pleban

Spis treści

1. Wstęp 9

1.1. Wprowadzenie 9
1.2. Narażenie na hałas 12
1.3. Zakres pracy 18

2. Jakość akustyczna. Cele badań. Jakość akustyczna maszyny 21

2.1. Wprowadzenie 21
2.2. Jakość akustyczna pomieszczeń 22
2.3. Jakość akustyczna wyrobów 25
2.4. Cele badań i teza badawcza 32
2.5 Definicja jakości akustycznej maszyny 34

3. Zapewnienie jakości w badaniach i ocenie akustycznej maszyn 36

3.1. Wprowadzenie 36
3.2. Ocena akustyczna maszyn 38
3.3. Zapewnienie jakości na etapie projektowania akustycznego i produkcji maszyn 41
3.4. Zapewnienie jakości badań w ocenie akustycznej maszyn 48

4. Wskaźniki oceny akustycznej maszyn 52

4.1. Wprowadzenie 52
4.2. Wskaźnik energetyczny i wskaźnik emisyjny 54
4.3. Wskaźniki promieniowania i przeniesienia energii 56

5. Metoda inwersji w badaniach procesów wibroakustycznych 61

5.1. Wprowadzenie 61
5.2. Metoda inwersji w modelowaniu akustycznym maszyn 63
5.3. Badania weryfikacyjne metody modelowania akustycznego wykorzystującego metodę inwersji 67
5.4. Wskaźniki promieniowania i przeniesienia energii młota kuźniczego 74

6. Miara jakości akustycznej maszyny 81

6.1. Wprowadzenie 81
6.2. Globalny wskaźnik jakości akustycznej maszyny 83

6.3. Wskaźniki cząstkowe 84
6.3.1. Wskaźnik mocy akustycznej 84
6.3.2. Wskaźnik odległości stanowiska pracy od maszyny 85
6.3.3. Wskaźnik kierunkowości promieniowania 85
6.3.4. Wskaźnik hałasu impulsowego i uderzeniowego 86
6.3.5. Wskaźnik rozkładu widma 86
6.4. Metody wyznaczania wskaźników cząstkowych jakości akustycznej maszyn 87
6.4.1. Wyznaczanie wskaźnika mocy akustycznej 87
6.4.2. Wyznaczanie wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny 88
6.4.3. Wyznaczanie wskaźnika kierunkowości promieniowania 89
6.5. Badania doświadczalne generatorów prądotwórczych 90
6.6. Badania symulacyjne globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny 95

7. Prognozowanie hałasu na podstawie globalnego wskaźnika jakości akustycznej 100

7.1. Wprowadzenie 100
7.2. Program do prognozowania emisji hałasu maszyn i ich optymalnej lokalizacji w pomieszczeniach przemysłowych 102
7.2.1. Założenia ogólne 102
7.2.2. Algorytm genetyczny do wspomagania prawidłowego rozmieszczenia maszyn z zastosowaniem globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny 104
7.2.3. Zastosowanie algorytmu genetycznego w narzędziu informatycznym 111
7.3. Prognozowanie hałasu w pomieszczeniach oraz optymalizacja lokalizacji maszyn i stanowisk pracy – badania laboratoryjne i symulacyjne 118

8. Podsumowanie 131

Załączniki

Załącznik 1. Regulacje prawne dotyczące oceny zgodności maszyn 143

Załącznik 2. Dopuszczalne wartości hałasu na stanowiskach pracy w Polsce 163

Literatura 165

Akty prawne i normy 178

1
Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Od początku lat osiemdziesiątych XX wieku obserwuje się na świecie intensywny rozwój prac z zakresu jakości, a ich wyniki są wdrażane głównie w formie dokumentów, takich jak normy i akty prawne. Początkowo jakość była postrzegana jako system jakości i jako jakość wyrobu. System jakości, definiowany jako struktura organizacyjna, podział odpowiedzialności, procedury, procesy i zasoby umożliwiające wdrożenie zarządzania jakością został z czasem zastąpiony systemem zarządzania jakością, przez który rozumie się system zarządzania służący do kierowania organizacją i jej nadzorowania w odniesieniu do jakości [117]. W wyniku rozwoju nauk o zarządzaniu powstały różne systemy zarządzania, wśród których poza zarządzaniem jakością najpowszechniejsze są systemy zarządzania środowiskiem oraz systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Systemy te są oparte na znormalizowanych wymaganiach i wytycznych, i coraz częściej funkcjonują w przedsiębiorstwach w formie zintegrowanego systemu zarządzania.

Także na przestrzeni czasu zmieniło się znaczenie jakości wyrobu. Jakość może być kojarzona z cechami i właściwościami technologicznymi wyrobu (np. funkcjonalnością, niezawodnością, trwałością, bezpieczeństwem użytkowania). Innym podejściem jest wyrażenie poprzez jakość stopnia zaspokojenia przez wyrób potrzeb użytkownika.

Rozwojowi badań z zakresu systemów jakości towarzyszył intensywny postęp prac w dziedzinie badań, oceny i certyfikacji wyrobów, w tym także maszyn. Ich efektem było między innymi wprowadzenie w połowie lat 80. ubiegłego wieku w państwach Unii Europejskiej tzw. nowego podejścia do

badań i certyfikacji, stanowiącego podstawę do wdrożenia procedur oceny zgodności wyrobów z podstawowymi wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia, określonymi w odpowiednich dyrektywach. W odniesieniu do maszyn procedura oceny zgodności obejmuje wymaganie oceny akustycznej ograniczonej do wyznaczenia tylko od jednej do dwóch wielkości charakteryzujących emisję hałasu maszyny, bez jednoczesnego określenia ich wartości dopuszczalnych. Brak ustalonych wartości dopuszczalnych hałasu nie jest jedyną wadą oceny zgodności maszyn – ocena ta również nie dostarcza użytkownikowi maszyny odpowiedzi na następujące pytania: czy w określonych u użytkownika warunkach eksploatacyjnych maszyny nie zostanie przekroczona wartość dopuszczalna hałasu na stanowiskach pracy? oraz: jak wykorzystać wyniki oceny akustycznej do wyznaczania optymalnej lokalizacji maszyny w pomieszczeniu eksploatacyjnym?

Wspomniane zmiany znaczenia pojęcia jakości wyrobu były wynikiem między innymi rozszerzenia zarówno listy rodzajów wyrobów podlegających ocenie pod względem jakości, jak i zakresu cech i właściwości wyrobów wpływających na poziom jakości. Przykładem jest intensywny rozwój prac na temat jakości akustycznej wyrobów (od lat 90. ubiegłego wieku). Jakość ta jest określana na podstawie informacji uzyskiwanych między innymi w ramach badań psychoakustycznych oraz badań subiektywnych dotyczących wrażeń słuchowych na temat odbieranych dźwięków. Brakuje natomiast metody umożliwiającej określenie jakości akustycznej wyrobu w sposób obiektywny.

Autor niniejszego opracowania od wielu lat prowadzi badania związane z zastosowaniem metod wskaźnikowych do analizy i oceny procesów wibroakustycznych zachodzących w maszynach, a także dotyczące oceny maszyn ze względu na emitowany przez nie hałas.

W opracowaniu tym opisano wiele zrealizowanych badań:

- teoretycznych
- doświadczalnych (w tym dotyczących modelowania akustycznego – określania akustycznych modeli zastępczych maszyn)
- symulacyjnych.

Dotyczą one zarówno badania procesów wibroakustycznych, jak i ocen akustycznych maszyn. Ponadto scharakteryzowano opracowane narzędzie informatyczne – oprogramowanie wspomagające optymalną lokalizację maszyn

i stanowisk pracy w pomieszczeniach eksploatacyjnych pod kątem minimalizacji szkodliwego oddziaływania hałasu na pracowników. W badaniach procesów wibroakustycznych zachodzących w maszynach zastosowano metodę inwersji.

W ostatnich latach metody inwersji są coraz powszechniej stosowane w różnych dziedzinach nauki i życia, w tym między innymi w geofizyce, medycynie czy mechanice. W mechanice są wykorzystywane na przykład w teorii sprężystości, teorii plastyczności, a także w wibroakustyce [18]. Jednym z inicjatorów coraz częstszego zastosowania metod inwersji w wibroakustyce jest prof. Zbigniew Engel [18, 21, 22, 23]. Zasada metody inwersji w wymienionych dziedzinach nauki zgodnie z pracą [18] polega na określaniu parametrów modelu przez odpowiednie manipulacje obserwowanych danych. Zasada ta została wykorzystana przez autora niniejszego opracowania do sporządzania akustycznych modeli zastępczych badanych maszyn.

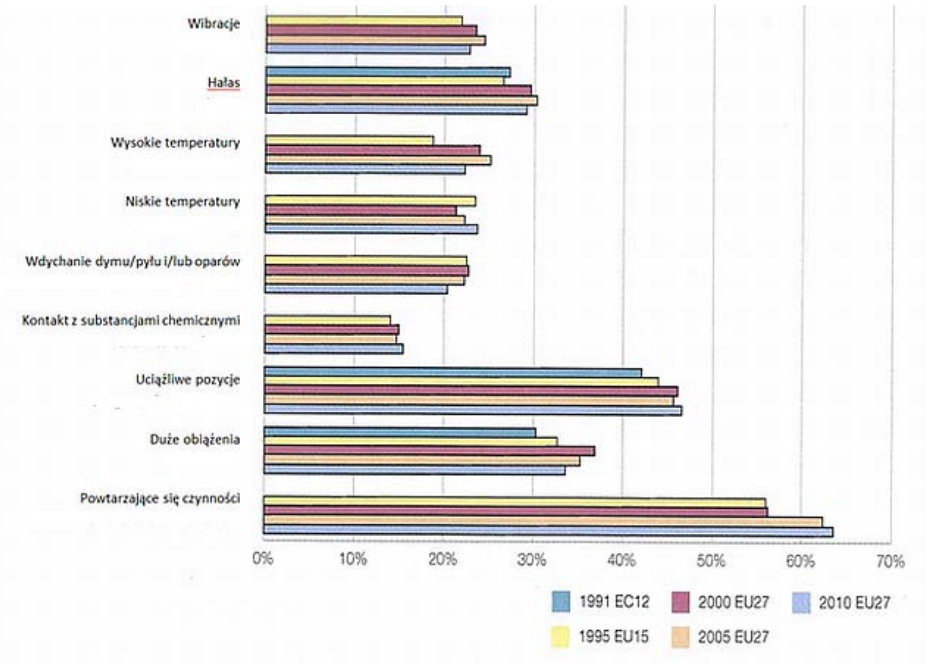
Wyniki badań opisane w niniejszym opracowaniu zostały wykorzystane do oceny akustycznej maszyn utożsamionej z bezpieczeństwem użytkowania maszyny ze względu na emitowany hałas, co stanowi pewną formę jakości maszyny. Lecz najistotniejszym wynikiem tych prac jest zdefiniowanie pojęcia *jakości akustycznej maszyny*, charakteryzującej hałas maszyny w warunkach eksploatacyjnych (co ma szczególne znaczenie dla jej użytkownika) i zaproponowanie nowego wskaźnika oceny akustycznej maszyny, za pomocą którego jej jakość akustyczna może zostać zmierzona.

Jakość akustyczną maszyny w warunkach eksploatacyjnych zdefiniowano jako zbiór cech maszyny oraz pomieszczenia eksploatacyjnego, wpływających na poziom hałasu oddziałującego na osoby w tym pomieszczeniu. Jakość akustyczna maszyny może być sparametryzowana i osiągać wartości wysokie, jeśli poziom ciśnienia akustycznego na stanowisku pracy nie przekracza wartości dopuszczalnych, lub niskie, jeśli stwierdzone jest przekroczenie wartości dopuszczalnych hałasu.

Jakość akustyczną można kształtować za pomocą zespołu zaplanowanych i systematycznie realizowanych działań w fazach projektowania, produkcji, instalowania i eksploatacji maszyny, których celem jest zapewnienie emisji odpowiednio niskiego poziomu dźwięku, niepowodującego zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy w pomieszczeniu eksploatacyjnym. Miarą jakości akustycznej maszyny jest globalny wskaźnik jakości akustycznej.

1.2. Narażenie na hałas

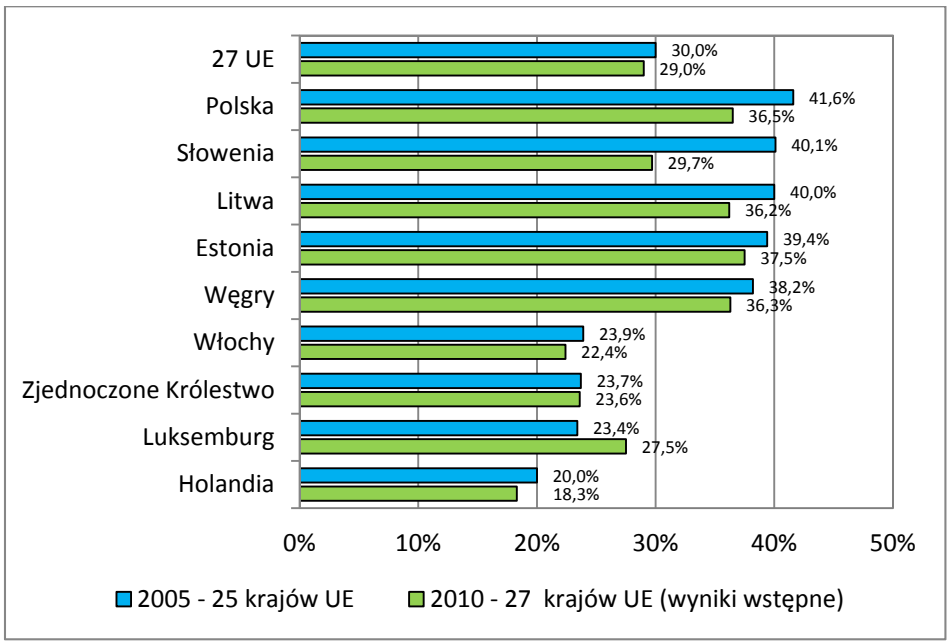
W Unii Europejskiej na intensywny hałas skarży się ok. 80 mln pracowników (tj. 1/3 ogółu pracujących). Dane te są wynikiem przeglądów warunków pracy w państwach członkowskich Unii, przeprowadzanych przez Europejską Fundację na rzecz Poprawy Warunków Życia i Pracy (z siedzibą w Dublinie) [33]. Przeglądów dokonano w latach: 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 na podstawie analizy wyników badań ankietowych – wywiadów przeprowadzonych z grupą reprezentatywną dla ludności pracującej. Na pytanie: *czy jest Pan/i narażony/a na taki hałas, że trzeba podnosić głos, porozumiewając się z innymi osobami?* – ok. 30% ankietowanych pracowników odpowiedziało: *tak, przez co najmniej ¼ czasu pracy* (rys. 1.1) [2, 13, 34, 35, 95].



Rys. 1.1. Pracownicy skarżący się na czynniki szkodliwe i uciążliwe przez co najmniej ¼ czasu pracy (wg badań Europejskiej Fundacji na rzecz Poprawy Warunków Życia i Pracy) [95]

Odsetek osób skarżących się na hałas był mniejszy od odsetka osób skarżących się na powtarzające się czynności i uciążliwe pozycje, natomiast większy od odsetka osób skarżących się na wibracje, niską temperaturę, wdychanie dymów, spalin i pyłów, kontakt z substancjami chemicznymi i różne rodzaje promieniowania (rys. 1.1). Jednocześnie w latach 1990-2005 zaobserwowano niewielką tendencję wzrostową w zakresie narażenia na hałas.

Porównanie wyników badań w różnych państwach członkowskich (badania z lat 2005-2010) wykazało, że najbardziej narażeni na hałas czuli się pracownicy w Polsce, Słowenii, Litwie, Estonii i na Węgrzech, czyli w nowych państwach członkowskich, a najmniej – w Holandii, Włoszech, Zjednoczonym Królestwie i Luksemburgu (rys. 1.2).

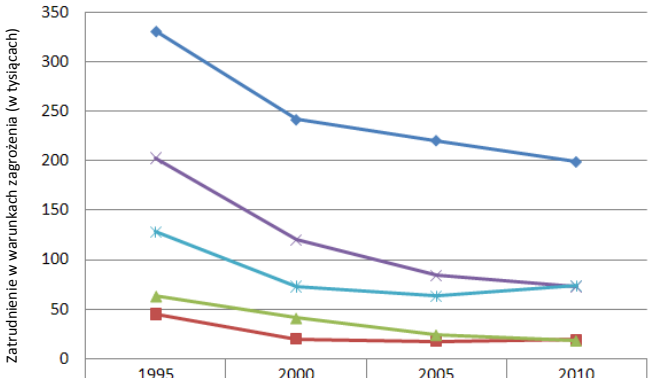


Rys. 1.2. Pracownicy skarżący się na hałas przez co najmniej ¼ czasu pracy w wybranych państwach członkowskich UE (wg badań Europejskiej Fundacji na rzecz Poprawy Warunków Życia i Pracy) [95]

Przeprowadzone badania wykazały również, że najbardziej narażeni na hałas są pracownicy w następujących sektorach gospodarki: budownictwie, rolnictwie, przetwórstwie przemysłowym (produkcji) i górnictwie. W dwóch ostatnich sektorach większe narażenie na hałas występuje w nowych państwach członkowskich niż w państwach dawnej „piętnastki".

Według informacji zbieranych przez Europejską Agencję Zdrowia i Bezpieczeństwa w Pracy w Bilbao regularnie przekraczane są wartości graniczne ekspozycji na hałas w wielu sektorach gospodarki, takich jak rolnictwo, budownictwo, przetwórstwo przemysłowe, w tym produkcja drewna, produkcja metali, produkcja żywności i napojów, a także w sektorze rozrywki. Uszkodzenie słuchu jest wciąż jedną z najszerzej rozpowszechnionych chorób zawodowych. W latach 1999-2001 w Unii Europejskiej koszty odszkodowań z tytułu uszkodzenia słuchu wywołanego hałasem stanowiły ok. 10% całkowitych kosztów odszkodowań związanych z chorobami zawodowymi.

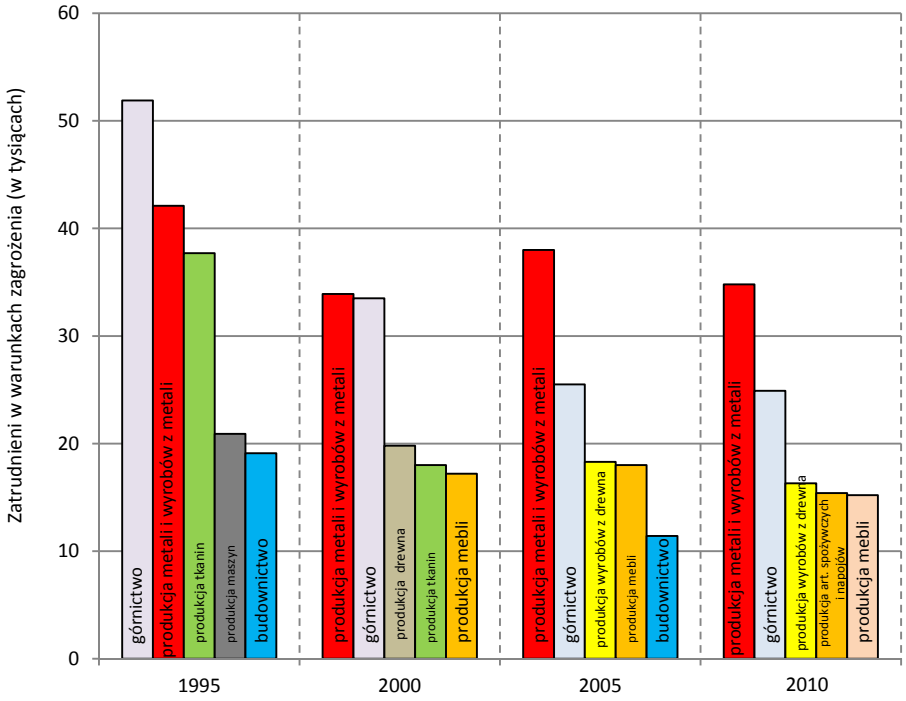
Z danych Głównego Urzędu Statystycznego o narażeniu zawodowym pracowników w latach 1995-2010 w Polsce (rys. 1.3) [133], zbieranych corocznie z zakładów zatrudniających powyżej 10 osób, wynika, że liczba osób zatrudnionych w warunkach zagrożenia hałasem, tj. w warunkach przekroczenia wartości najwyższego dopuszczalnego natężenia (NDN) hałasu (85 dB), wynosiła ok. 330 tys. w 1995 r. oraz ok. 199 tys. w 2010 r. i stanowiła ok. 1/2 liczby wszystkich zatrudnionych w warunkach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i uciążliwymi.



	1995	2000	2005	2010
hałas	330,8	241,6	220,5	199
wibracje	44,9	20,1	17,8	19,1
substancje chemiczne	63,4	41,1	24,1	18,3
pyły	202,6	120,1	83,9	73
nadmierne obciążenie fizyczne	128	72,7	63,3	73,5

Rys. 1.3. Zatrudnieni w warunkach zagrożenia czynnikami szkodliwymi i uciążliwymi w latach 1995-2010 (wg Głównego Urzędu Statystycznego) [133]

Największą liczbę zagrożonych hałasem odnotowano w górnictwie oraz w produkcji metali i wyrobów z metali we wszystkich rozpatrywanych latach (rys. 1.4). W 1995 r. na trzecim miejscu była produkcja tkanin, w latach 2000-2010 trzecie miejsce zajęła produkcja drewna i wyrobów z drewna, a kolejne – produkcja mebli. Zmiany te odzwierciedlały stan gospodarki narodowej i stan zatrudnienia w poszczególnych sektorach i grupach.



Rys. 1.4. Zatrudnieni w warunkach zagrożenia hałasem w wybranych sektorach i grupach w latach 1995-2010 (wg Głównego Urzędu Statystycznego) [133]

Głównymi źródłami hałasu w środowisku pracy są maszyny i urządzenia wymienione w tab. 1.1.

Ogólne zasady eliminowania zagrożeń i ograniczania narażenia pracowników na hałas w środowisku pracy obejmują:

- unikanie lub eliminowanie zagrożeń hałasem
- przeprowadzanie oceny ryzyka związanego z zagrożeniami hałasem, których nie można uniknąć lub wyeliminować
- zwalczanie zagrożeń hałasem u źródła ich powstawania

- dostosowanie pracy do pracownika poprzez projektowanie stanowisk pracy o ograniczonym hałasie, wybór maszyn i sprzętu roboczego o zmniejszonej emisji hałasu, wybór mniej hałaśliwych metod pracy i produkcji
- dostosowanie stanowisk pracy do postępu technicznego w zakresie środków technicznych ograniczenia hałasu (automatyzacja i zdalna obsługa maszyn oraz kabiny dźwiękoszczelne dla obsługi, obudowy dźwiękochłonno-izolacyjne maszyn, wibroizolacja maszyn, tłumiki akustyczne, ekrany akustyczne, adaptacje akustyczne pomieszczeń) oraz środków organizacyjnych (ograniczony czas pracy i przerwy w pracy na hałaśliwych stanowiskach pracy, tworzenie tzw. oaz ciszy, profilaktyka lekarska, w tym badania lekarskie obejmujące kontrolę słuchu, przesuwanie osób szczególnie wrażliwych na działania hałasu oraz osób z upośledzonym słuchem do pracy w warunkach mniej hałaśliwych)
- stosowanie ochronników słuchu, ich właściwy dobór i kontrola stosowania
- informowanie pracowników o zagrożeniu hałasem i skutkach narażenia oraz szkolenie pracowników w zakresie poprawnego i bezpiecznego posługiwania się środkami pracy.

Tabela 1.1. Główne źródła hałasu w środowisku pracy [7, 120]

Źródło hałasu	**Poziom dźwięku A w dB**
Maszyny stanowiące źródło energii (silniki spalinowe, sprężarki, maszyny elektryczne, transformatory, agregaty prądotwórcze)	98 – 130
Narzędzia i silniki pneumatyczne (wiertarki, szlifierki, młotki, nitownice, zdzieraki, ubijaki)	90 –120
Maszyny do obróbki plastycznej (prasy, młoty, ciągarki, prostownice, walcarki)	92 – 120
Maszyny do rozdrabniania, kruszenia, przesiewania, przecinania, oczyszczania (sita wibracyjne, kraty wstrząsowe, młyny kulowe, piły, bębny do czyszczenia odlewów, piaskarki)	96 – 111

Tabela 1.1, cd.

Źródło hałasu	**Poziom dźwięku A w dB**
Obrabiarki skrawające do metali (automaty tokarskie, tokarki kołowe wielonożowe, rewolwerowe, szlifierki, frezarki, wiertarki)	92 – 105
Obrabiarki skrawające do drewna (piły łańcuchowe, strugarki, frezarki, szlifierki, pilarki tarczowe i taśmowe)	92 – 108
Maszyny włókiennicze (krosna, przędzarki, skręcarki, rozciągarki, przewijarki, koronkarki, zgrzeblarki, dziewiarki osnowowe, automaty pończosznicze)	93 – 114
Urządzenia przepływowe (wentylatory, zawory, reduktory, strumienice, palniki, iniektory, dysze w piecach)	98 – 120
Urządzenia transportu wewnątrzzakładowego (przenośniki, podajniki, przesypy, suwnice)	98 – 112

Coraz powszechniej w technicznych środkach redukcji hałasu wykorzystuje się nowe technologie oraz innowacyjne rozwiązania, w tym m.in. materiały inteligentne, sieci neuronowe, techniki metod aktywnych oraz algorytmy genetyczne.

Ponadto, zgodnie z dyrektywą maszynową 2006/42/WE [150], obowiązują następujące wymagania w zakresie ochrony przed hałasem:

- maszyna powinna być zaprojektowana i wykonana w taki sposób, aby zagrożenia wynikające z emisji hałasu były zredukowane do najniższego poziomu, z uwzględnieniem postępu technicznego i dostępności środków ograniczenia hałasu, w szczególności u źródła jego powstawania
- instrukcja dołączona do maszyny powinna zawierać informacje na temat emisji hałasu:
  - równoważny poziom dźwięku A na stanowisku pracy
  - szczytowy poziom dźwięku C na stanowisku pracy
  - poziom mocy akustycznej A.

Jednak z licznych badań przeprowadzonych w krajach UE na zlecenie Komisji Europejskiej wynika, że dla znacznej części użytkowników maszyn podawane w decybelach wartości charakteryzujące emisję hałasu nie są zrozumiałe. W związku z tym zorganizowano m.in. dwie konferencje międzynarodowe

(„Towards a greater awareness of low-noise outdoor machinery" w Brukseli, październik 2010 r. [138], „Buy – Quiet 2011" w Paryżu, lipiec 2011 r. [56] i warsztaty „Buy-Quiet" w Nowym Jorku, sierpień 2012 r.), których celem było zainicjonowanie działań ukierunkowanych na opracowanie nowych zasad podawania informacji na temat hałasu emitowanego przez maszyny – w formie wskaźnikowej.

Jednocześnie od ponad 10 lat obserwuje się zainicjowany w Polsce przez prof. Z. Engela rozwój metod wskaźnikowych w wibroakustyce [30]. W wyniku realizowanych prac naukowo-badawczych z tego zakresu opracowano między innymi wskaźniki oceny akustycznej maszyn [21, 24], wskaźniki oceny klimatu akustycznego hal przemysłowych [21, 23] oraz wskaźniki jakości obiektów sakralnych [19]. Zgodnie z tymi tendencjami niniejsze opracowanie dotyczy nowego wskaźnika oceny akustycznej maszyny – globalnego wskaźnika jej jakości akustycznej, umożliwiającego zarówno ocenę jak i prognozowanie hałasu emitowanego przez maszynę w warunkach eksploatacyjnych. Prognozowanie to wykonuje się za pomocą innowacyjnego rozwiązania – oprogramowania wykorzystującego algorytm genetyczny.

1.3. Zakres pracy

W celu zapewnienia skutecznej i kompleksowej oceny akustycznej maszyny, uwzględniającej aspekty jakościowe, uzasadnione wydaje się wzięcie pod uwagę całego cyklu życia maszyny, obejmującego następujące etapy [11]:

1) projektowanie
2) produkcja
3) zainstalowanie
4) eksploatacja
5) likwidacja.

Jednocześnie należy zapewnić, by wszelkie działania realizowane w ramach pierwszych dwóch etapów życia maszyny były objęte stosownym systemem zarządzania jakością. Dotyczy to również działań cząstkowych, jak wykonywanie badań parametrów akustycznych maszyn i prowadzanie oceny akustycznej maszyn.

Taki sposób działania przyjęto w niniejszym opracowaniu. Przedstawiono obszerny materiał dotyczący wyników zrealizowanych badań doświadczalnych i symulacji komputerowych. Obiektami tych badań były zarówno urządzenia o niewielkich wymiarach (generatory prądotwórcze, odkurzacz przemysłowy), jak i duża maszyna stacjonarna – młot kuźniczy. W rozdziale 2. przedstawiono wyniki analizy ogólnoświatowego stanu wiedzy dotyczącej jakości akustycznej pomieszczeń (ze szczególnym uwzględnieniem hal przemysłowych) oraz jakości akustycznej wyrobów. Omówiono zasady wykonywania procesu oceny jakości akustycznej wyrobów oraz scharakteryzowano kierunki prac z zakresu jakości akustycznej gamy wyrobów realizowanych w najważniejszych ośrodkach światowych. Wyniki tej analizy posłużyły do sformułowania celów badań niniejszego opracowania. W rozdziale 2. zdefiniowano również pojęcie jakości akustycznej maszyny.

W rozdziale 3. oraz w załączniku 1. opisano ogólne zasady oceny zgodności wyrobów w krajach Unii Europejskiej, ze szczególnym uwzględnieniem wymagań dotyczących oceny emitowanego hałasu. W tym obszarze istotne znaczenie ma dyrektywa maszynowa [150]. Jej główne elementy scharakteryzowano w załączniku 1. W rozdziale 3. omówiono również ważne zagadnienia związane z jakością w badaniach i ocenie akustycznej maszyn, w tym zapewnienie jakości na etapach prośrodowiskowego projektowania i produkcji maszyn. Jako dobrą praktykę akustyczną opracowano procedurę ekoprojektowania maszyn, uwzględniającą zarówno metody redukcji hałasu jak i cele rozwoju zrównoważonego poprzez stosowanie tzw. zasady 3R (ang. *reduce, reuse, recycle* – redukuj, użyj ponownie, poddaj recyklingowi). Opisano główne etapy projektowania z uwzględnieniem aspektów redukcji hałasu oraz wymagania dotyczące zapewnienia jakości w laboratoriach wykonujących badania parametrów akustycznych hałasu maszyn.

W rozdziale 4. omówiono dotychczasowe, opracowane przez autora, wskaźniki oceny akustycznej maszyn – energetyczny, emisyjny, promieniowania energii i przeniesienia energii.

Procesy wibroakustyczne zachodzące w maszynach mogą być badane różnymi metodami, w tym energetycznymi czy wzajemnościowymi. Jednak systematyczny rozwój technik pomiarowych umożliwiających równoległe zbieranie danych i ich przetwarzanie w czasie rzeczywistym, jak również zwięk-

szanie mocy obliczeniowych systemów komputerowych umożliwiają coraz skuteczniejsze stosowanie metod inwersji. Jak już wspomniano, zastosowano metodę inwersji do badań procesów wibroakustycznych, w tym do modelowania akustycznego maszyn, które jest istotnym elementem procesu projektowania maszyny. Podejście to omówiono w rozdziale 5. Poza analizą metody inwersji stosowanej w modelowaniu przedstawiono wyniki weryfikacji modelowania na przykładzie małego urządzenia – odkurzacza przemysłowego. Uzyskany model zastępczy był następnie punktem wyjścia do badań symulacyjnych w celu zminimalizowania emisji hałasu. W rozdziale 5. zamieszczono również wyniki badań związane z wyznaczeniem wskaźników promieniowania i przeniesienia energii oraz z określeniem bilansu energetycznego na przykładzie młota kuźniczego.

W rozdziale 6. opisano wzorem matematycznym globalny wskaźnik jakości akustycznej. Wskaźnik ten jest funkcją wielu wskaźników cząstkowych, które zostały zdefiniowane i opisane odpowiednimi wzorami. Opisano metody umożliwiające wyznaczenie globalnego wskaźnika jakości akustycznej. Aby wykazać przydatność opracowanego wskaźnika do oceny akustycznej, przeprowadzono badania eksperymentalne grupy czterech generatorów prądotwórczych, których wyniki stanowią istotną część rozdziału 6. Wyniki tych badań, jak również opisanych badań symulacyjnych, potwierdziły przydatność opracowanego wskaźnika.

W rozdziale 7. scharakteryzowano opracowane specjalistyczne oprogramowanie komputerowe, które umożliwia prognozowanie hałasu w pomieszczeniach eksploatacyjnych oraz – z wykorzystaniem algorytmu genetycznego – umożliwia prawidłowe rozmieszczenie maszyn i stanowisk pracy w pomieszczeniach na podstawie wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej. W celu weryfikacji poprawności funkcjonowania oprogramowania przeprowadzono eksperymenty z generatorami prądotwórczymi. Zamieszczone wyniki badań symulacyjnych oraz wyniki badań eksperymentalnych zrealizowanych w pomieszczeniach eksploatacyjnych potwierdziły prawidłowość funkcjonowania oprogramowania.

W ostatnim rozdziale przedstawiono podsumowanie oraz wnioski z wykonanych badań.

2

Jakość akustyczna. Cele badań. Jakość akustyczna maszyny

2.1. Wprowadzenie

Nieodłącznym elementem towarzyszącym układowi źródło dźwięku (nadajnik) – człowiek (odbiornik) jest środowisko, w którym ten układ jest umiejscowiony. Na ocenę tego układu pod kątem jakości akustycznej, z uwzględnieniem podziału środowiska na zewnętrzne i wewnętrzne (tj. przestrzeń zamkniętą – pomieszczenie), składają się:

- jakość akustyczna źródła dźwięku
- jakość akustyczna pomieszczenia
- jakość akustyczna środowiska zewnętrznego.

W opracowaniu skupiono się jedynie na układzie źródło dźwięku – człowiek, który jest zlokalizowany w przestrzeni zamkniętej, i dlatego pominięto zagadnienia dotyczące jakości akustycznej środowiska zewnętrznego.

Zasadniczo ocena akustyczna pomieszczeń jest związana z funkcjami, jakie dane pomieszczenie spełnia. Na przykład, w przypadku pomieszczeń szkolnych, w których odbywa się przekaz słowny, najważniejszym czynnikiem determinującym ich jakość akustyczną jest zrozumiałość mowy. Natomiast odmienne wymagania są stawiane na przykład salom koncertowym, w których należy zapewnić, według pracy [19], między innymi wysoką wyrazistość utworów muzycznych oraz dobre brzmienie dźwięku.

Podobnie zróżnicowana jest ocena jakości akustycznej źródeł dźwięku, która zależy od rodzaju źródła dźwięku. Na przykład w odniesieniu do urządzeń elektroakustycznych i elektronicznych (np. zestawów głośnikowych, odtwarzaczy płyt CD) jakość dźwięku jest definiowana jako stopień dokładności,

z jakim urządzenie emituje dźwięki w porównaniu z dźwiękami oryginalnymi [17]. Inna, szersza definicja jakości akustycznej źródeł dźwięku mówi, że jakość akustyczna to stan psychicznej przyjemności lub zmęczenia odczuwanego przez słuchacza [17]. Zatem jakość akustyczną źródła dźwięku można wyrazić poprzez reakcję człowieka na dźwięki przez nie emitowane. Przykładem źródła dźwięku charakteryzującego się wysoką jakością akustyczną dla większości miłośników motoryzacji mogą być charakterystyczne dźwięki emitowane przez prestiżowy motocykl marki Harley.

2.2. Jakość akustyczna pomieszczeń

Zasadniczo ocenę jakości akustycznej pomieszczeń wykonuje się na podstawie odbioru dźwięków mowy i muzyki. Zgodnie z pracą [19] klasyczne metody tej oceny, tj. metoda Beranka, metoda Ando, metoda RASTI i impulsowa, dotyczą pomieszczeń takich jak sale koncertowe, operowe i audytoria. W metodach tych badanymi i ocenianymi parametrami są między innymi czas pogłosu, poziom odsłuchu czy współczynnik RASTI. Natomiast w przypadku pomieszczeń sakralnych w pracy [19] zaproponowano globalny wskaźnik jakości akustycznej obiektów sakralnych. Wskaźnik ten jest funkcją pięciu wskaźników cząstkowych, charakteryzujących czas pogłosu, zakłócenia zewnętrzne, zrozumiałość mowy, walory brzmieniowe muzyki oraz równomierność nagłośnienia.

Także wskaźnikową metodę oceny jakości akustycznej opracowano dla pomieszczeń długich, obustronnie otwartych, których przykładem są stacje metra [89]. W tym przypadku wskaźnik oceny zależy od wskaźników charakteryzujących kształt pomieszczenia, jego wymiary, elementy pochłaniające dźwięk, elementy rozpraszające dźwięk, czas pogłosu oraz poziom tła akustycznego.

Zupełnie inny charakter w porównaniu z wymienionymi pomieszczeniami mają hale przemysłowe. Do oceny ich jakości akustycznej również opracowano metody wskaźnikowe. Podstawowa wskaźnikowa metoda oceny jakości klimatu akustycznego hal przemysłowych [21, 98, 99, 100, 101] jest oparta na trzech wskaźnikach cząstkowych: technologicznym, mocy i właściwości akustycznych

hali. Ponadto możliwe jest rozszerzenie tej metody o dodatkowe wskaźniki: wskaźnik hałasu impulsowego i uderzeniowego, wskaźnik zagospodarowania hali, wskaźnik rozkładu widma i wskaźnik hałasu niskoczęstotliwościowego.

Zgodnie z pracą [21] globalny wskaźnik klimatu akustycznego hali przemysłowej, W_{GKA}, którego wartość jest odniesiona do kryteriów oceny ryzyka zawodowego wynikających z narażenia na hałas i zawiera się w przedziale od 0 do 1, jest wyrażony wzorem (2.1):

$$W_{GKA} = 0{,}9W_{KA} + 0{,}1W_{STP} \tag{2.1}$$

gdzie:

W_{KA} – wskaźnik jakości klimatu akustycznego hali przemysłowej

W_{STP} – wskaźnik oceny zagrożenia na stanowiskach pracy.

Wskaźnik jakości klimatu akustycznego, W_{KA}, zawiera skumulowaną informację o warunkach akustycznych w hali, a wskaźnik oceny zagrożenia na stanowiskach pracy, W_{STP} – o wpływie lokalnych klimatów akustycznych na pracowników. Te dwa wskaźniki cząstkowe mają podstawowe znaczenie w opisie sytuacji akustycznej hali przemysłowej.

W celu dokonania oceny jakości klimatu akustycznego hali przemysłowej za pomocą wskaźnika W_{KA}, wprowadzono trzy, wspomniane wcześniej, wskaźniki cząstkowe, oceniające:

- hałaśliwość procesu technologicznego, W_T
- zdolność generowania hałasu (moc akustyczną maszyn i urządzeń w hali), W_N
- właściwości akustyczne i geometryczne hali, W_A.

Jeśli znane są wartości wymienionych wskaźników cząstkowych, to wartość wskaźnika W_{KA} oblicza się ze wzoru (2.2):

$$W_{KA} = \sqrt{\frac{W_T^{\,2} + W_N^{\,2} + W_A^{\,2}}{3}} \tag{2.2}$$

Wskaźnik technologiczny, W_T, jest wyznaczany na podstawie identyfikacji aktualnego stanu hałaśliwości procesu technologicznego z wykorzystaniem zależności (2.3):

$$W_T = \frac{\sum_{h=0}^{n} \eta_h S_h}{S_H} \tag{2.3}$$

gdzie:

η_h – współczynnik wagi hałaśliwości powierzchni S_h dla h-tej izofony, którego wartości podane są w pracy [21]

S_h – pole powierzchni hali objęte krzywą jednakowego poziomu dźwięku ($L_{DO} + h$, dB), w m^2 (L_{DO} – dopuszczalna wartość poziomu hałasu dla ocenianej hali, $h = 0, 1, ...n$)

S_H – całkowite pole powierzchni podłogi hali, w m^2

$n = L_{\max} - L_{DO}$ – liczba izofon ponad izofoną L_{DO}.

Wskaźnik mocy akustycznej, W_N, dla ocenianej hali określają zależności (2.4) i (2.5):

$$W_N = 1 \quad \text{jeśli} \quad \sum_{i=1}^{n} N_i \le N_{a0} \tag{2.4}$$

$$W_N = \frac{N_{a0}}{\sum_{i=1}^{n} N_i} \quad \text{jeśli} \quad \sum_{i=1}^{n} N_i > N_{a0} \tag{2.5}$$

gdzie:

N_i – moc akustyczna i-tej działającej maszyny (urządzenia) zainstalowanej w hali, w W

V_H – objętość hali, w m^3

n – liczba działających maszyn i urządzeń w hali

N_{a0} – moc akustyczna zastępczego źródła dźwięku emitującego hałas o poziomie L_{DO}, w dB, w obszarze odpowiadającym polu powierzchni podłogi hali S_H, w W.

Kolejnym wskaźnikiem niezbędnym do oceny akustycznej hali przemysłowej jest wskaźnik jakości akustycznej pomieszczenia, W_A, uwzględniający te parametry hali, które mają wpływ na poziom dźwięku w polu rozproszonym. Jedną z charakterystyk akustycznych właściwości pomieszczenia jest średni

współczynnik pochłaniania dźwięku wyznaczony na podstawie pomiarów czasu pogłosu badanej hali. Zatem wskaźnik właściwości akustycznych pomieszczenia, W_A, jest wyrażony wzorem (2.6):

$$W_A = 1 - \mathrm{e}^{\frac{-0{,}161 V_H}{S_C T}} \tag{2.6}$$

gdzie:

V_H – objętość hali, w m^3

S_C – pole powierzchni ograniczających pomieszczenie (ściany, sufit, podłoga), w m^2

T – czas pogłosu zmierzony w hali, w s.

Ostatnią daną niezbędną do oceny akustycznej hali przemysłowej jest wartość wskaźnika oceny zagrożenia na stanowiskach pracy, W_{STP}:

$$W_{STP} = 1 - \frac{n_Z}{n_C}, \text{ gdy } \quad n_c \neq 0 \tag{2.7}$$

$$W_{STP} = 1, \text{ gdy } \quad n_c = 0 \tag{2.8}$$

gdzie:

n_Z – liczba stanowisk pracy, na których przekroczono wartości dopuszczalnych poziomów hałasu

n_C – liczba wszystkich stanowisk pracy w ocenianej hali.

2.3. Jakość akustyczna wyrobów

Opisane w podrozdziale 2.2 metody oceny jakości akustycznej pomieszczeń zasadniczo są oparte na parametrach obiektywnych (przy czym w ostatnich latach można zaobserwować tendencję rozwoju metod wskaźnikowych). Zupełnie inny chatarakter mają metody stosowane do oceny jakości akustycznej wyrobów (ang. *product sound quality*). Systematyczny wzrost liczby wyrobów na rynku wymusza podejmowanie przez producentów działań w kierunku zwiększenia konkurencyjności. Jedną z cech wyrobu, która wpływa na jego konkurencyjność, jest jakość akustyczna. Intensywny rozwój

prac z zakresu jakości akustycznej wyrobów nastąpił na przełomie XX i XXI wieku. Jednym z prekursorów w tym obszarze jest Richard H. Lyon, który dla celów jakości akustycznej wprowadził nową definicję wyrobu i dokonał klasyfikacji wyrobów [79]. Zgodnie z tą definicją wyrobem jest urządzenie wyprodukowane w celu przyniesienia korzyści użytkownikowi i/lub do wykorzystania przez tego użytkownika. Definicja ta obejmuje trzy typy wyrobów:

- wyroby, dla których dźwięk jest podstawą jakości – są to instrumenty muzyczne, systemy odtwarzania dźwięków oraz pomieszczenia odsłuchowe
- wyroby, dla których dźwięk stanowi ważny czynnik decydujący o ich akceptacji – są to indywidualnie użytkowane urządzenia, samochody oraz instalacje grzewczo-wentylacyjno-klimatyzacyjne
- wyroby, nad którymi nie mamy kontroli lub które nie przynoszą nam korzyści – to wyroby powodujące hałas komunalny (środki komunikacji, maszyny budowlane), instalacje grzewczo-wentyla--cyjno-klimatyzacyjne użytkowane przez sąsiadów.

Lyon w pracy [80] stwierdził, że dźwięk emitowany przez wyrób określają cztery wielkości:

- siła dźwięku, charakteryzowana między innymi przez głośność dźwięku czy poziom dźwięku A
- dokuczliwość dźwięku, charakteryzowana między innymi przez głośność, ostrość, chropowatość
- przyjemność dźwięku, charakteryzowana między innymi przez harmoniczność, płynność
- zawartość informacji w dźwięku, umożliwiająca identyfikację wyrobu jak również ocenę jego stanu technicznego oraz tryb pracy.

Kombinacja wymienionych wielkości wpływa na to, w jakim stopniu dźwięk emitowany przez wyrób jest akceptowalny przez użytkownika, a tym samym stanowi podstawę do określenia jakości akustycznej wyrobu. Lyon zaproponował następującą definicję jakości akustycznej wyrobu [79, 80]: *jest to zauważalna reakcja na dźwięk emitowany przez wyrób, która odzwierciedla reakcję słuchacza polegającą na zaakceptowaniu dźwięku wyrobu. Przyjęto założenie, że im dźwięk jest bardziej akceptowalny, tym wyższa jest jakość aku-*

styczna wyrobu. Zatem jakość akustyczna jest reakcją człowieka na dźwięk i można stwierdzić, że jest charakterystyczna dla danego wyrobu – na przykład suszarka do włosów, oceniona jako wyrób o wysokiej jakości akustycznej, nie brzmi tak samo jak pralka automatyczna, która również jest oceniona jako wyrób o wysokiej jakości akustycznej.

Osiągnięcie wysokiej jakości akustycznej wyrobu wymaga zrealizowania procedury, na którą składają się następujące etapy [9, 80]:

- zdefiniowanie pożądanych parametrów wyrobu, w tym parametrów charakteryzujących emisję hałasu, oraz określenie grupy docelowej klientów wyrobu
- opracowanie bazy danych dotyczącej reprezentatywnych sygnałów dźwiękowych emitowanych przez konkurencyjne wyroby
- zorganizowanie grupy ekspertów – testowej grupy słuchaczy oceniających wyrób, oraz sporządzenie listy wyrazów charakteryzujących emitowany sygnał dźwiękowy [66]
- przedstawienie sygnału dźwiękowego grupie testowej słuchaczy i określenie jakości akustycznej wyrobu na podstawie badań psychoakustycznych
- przeprowadzenie specyficznej dla każdego wyrobu analizy dźwięku w celu zidentyfikowania cech charakterystycznych, które reprezentują pozytywne i negatywne składniki jakości akustycznej – określenie negatywnych i pozytywnych cech sygnału dźwiękowego
- modyfikacja wyrobu służąca zapewnieniu poprawy jakości akustycznej poprzez unikanie negatywnych cech dźwięku i wprowadzanie jego cech pozytywnych
- obiektywne oraz subiektywne badania mające na celu określenie ewentualnej różnicy między założeniami a osiągniętym poziomem.

Reasumując, można stwierdzić, że jakość akustyczna wyrobu to nie tylko jego głośność, ale także postrzeganie wyrobu na podstawie jego brzmienia. Do połowy lat 90. ubiegłego wieku obiektami badań jakości akustycznej były w przeważającej części wyroby przemysłu motoryzacyjnego – samochody osobowe [131]. Na stronie internetowej RH Lyon Corp [54] stwierdzono, że najbardziej znanym przykładem związku między hałasem emitowanym przez dany wyrób a jego jakością jest dźwięk powstający przy zamykaniu drzwi samochodu.

Im bardziej brzmi on jak solidne „bum", tym wyżej odbiorcy oceniają klasę pojazdu. Zagadnienie to jest uważane za jedno z najważniejszych w zakresie oceny komfortu/jakości akustycznej samochodów i w związku z tym podjęte zostały między innymi próby opracowania obiektywnego wskaźnika, będącego funkcją między innymi mocy akustycznej (w zakresie częstotliwości do 280 Hz) i głośności charakteryzujących zamykanie drzwi samochodowych [124].

Obecnie głównymi obiektami prac dotyczących jakości akustycznej są środki transportu, a w tym przede wszystkim samochody osobowe. Podstawowym źródłem hałasu w samochodzie jest silnik. Dlatego znaczna część badań dotyczy właśnie jego wpływu na jakość akustyczną, w tym między innymi kategoryzacji silników w kontekście jakości akustycznej [73], poprawy jakości akustycznej luksusowych samochodów z silnikami więcej niż sześciocylindrowymi [71]. Duża grupa prac jest skupiona na silnikach wysokoprężnych i ocenie ich jakości akustycznej [12, 52], w tym także na wpływie parametrów oleju napędowego na tę ocenę [62]. Ze względu na wzrastającą popularność pojazdów z napędem hybrydowym lub elektrycznym, także one podlegają ocenie akustycznej [12, 43]. Pociągnęło to za sobą konieczność opracowania zarówno zmodyfikowanych badań psychoakustycznych, jak i innowacyjnych narzędzi oceny jakości akustycznej [40]. Wspomniane badania wpływu silnika samochodu na jakość akustyczną pojazdu obejmują zarówno ocenę przeprowadzaną na zewnątrz pojazdu [12, 43, 62] jak i w jego wnętrzu [12, 62, 71, 73]. W przypadku oceny jakości akustycznej przeprowadzonej na zewnątrz pojazdów, oprócz samochodów znaczącą grupę stanowią motocykle [123] oraz pojazdy szynowe, w tym metro czy tramwaje i śródmiejskie linie kolejowe [72].

Na poziom jakości akustycznej wewnątrz pojazdu wpływ ma nie tylko silnik, lecz także wiele innych jego elementów i zespołów. Można tu wyróżnić między innymi opony i emitowany przez nie hałas. Wyniki badań wpływu tego hałasu w zależności od rodzaju bieżnika opony na jakość akustyczną zawarto w pracach [50, 97]. Hałas opon oczywiście też decyduje o wyniku oceny akustycznej na zewnątrz samochodu. W pracy [55] zaproponowano wskaźnik jakości dla opon samochodowych, umożliwiający prognozowanie jakości akustycznej wewnątrz i na zewnątrz pojazdu. Wartość tego wskaźnika jest określana na podstawie poziomu ciśnienia akustycznego składowych tonalnych w zakresie częstotliwości do 4 kHz.

Kolejnymi obiektami licznych badań dotyczących oceny jakości akustycznej wewnątrz pojazdów są instalacje *grzewczo-wentylacyjno-klimatyzacyjne* (tzw. HVAC) [70, 91, 119]. W cytowanej literaturze zaproponowano między innymi model oceny obiektywnej do prognozowania jakości akustycznej HVAC oraz określono wpływ temperatury na wyniki badań psychoakustycznych i jakości akustycznej.

Także wlotowe przewody powietrza czy urządzenia regulacji foteli oraz silniki elektryczne do otwierania szyb są obiektami prowadzonych badań dotyczących wpływu ich pracy na kształtowanie jakości akustycznej we wnętrzach samochodów [15, 38, 48, 130].

Postrzegana ocena jakości akustycznej wnętrza pojazdu jest wynikiem nie tylko bodźców dźwiękowych, lecz także takich czynników, jak temperatura, drgania mechaniczne przenoszone z siedziska do organizmu człowieka, a także obrazy za oknem samochodu widziane w trakcie badań. Wyniki badań dotyczących wpływu tych czynników na jakość akustyczną wnętrza samochodu zawarto w pracy [47]. W takich badaniach coraz powszechniejszym elementem stanowiska badawczego są interaktywne symulatory NVH (ang. *noise, vibration and harshness*) dokładnie odtwarzające hałas i drgania mechaniczne występujące w warunkach rzeczywistych [1, 44, 139].

Z omówionych kierunków badań, zdeterminowanych różnymi rodzajami źródeł hałasu, wynika, że osiągnięcie wysokiego poziomu jakości akustycznej wewnątrz samochodu wymaga zarówno uwzględnienia wszystkich źródeł hałasu, jak i osiągnięcia odpowiedniej równowagi między ich wzajemnym oddziaływaniem [67].

W badaniach jakości akustycznej wyrobów biorą udział zespoły osób oceniających dźwięki emitowane przez dany wyrób, następnie osoby te wypełniają ankiety dotyczące wrażeń charakteryzujących docierające do nich dźwięki. Z tego powodu wynik oceny jakości akustycznej wyrobu nie jest w pełni obiektywny. Zależy również od cech osobowych członków zespołu oceniającego. Potwierdziły to między innymi badania porównawcze jakości akustycznej wnętrz samochodów [6]. Te same pojazdy były zupełnie odmiennie ocenione na przykład przez europejskich i japońskich „słuchaczy". Wobec takiego stanu rzeczy prowadzone są badania naukowe w celu zapewnienia pełnego obiektywizmu oceny jakości akustycznej.

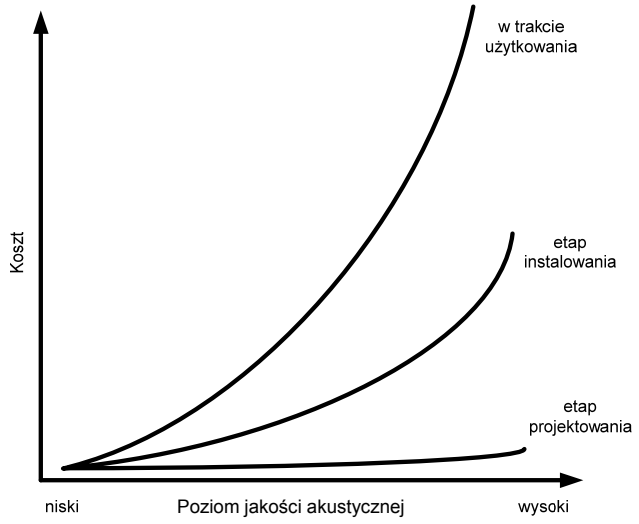
W literaturze można znaleźć liczne informacje na temat opracowanych propozycji narzędzi wspierających tę ocenę pod kątem osiągnięcia obiektywizmu badań. Przykładem takich rozwiązań są próby zastosowania do oceny jakości akustycznej między innymi transformaty falkowej [132, 140], sieci neuronowych [36, 58, 122], wskaźników obejmujących obiektywną i subiektywną ocenę (wskaźników psychoakustycznych [8], jakości [15], „zatrzaskiwania drzwi" [124], hałasu opony [55], fluktuacji hałasu [57], komfortu pasażera [59], preferencji klienta [96]), czy też tworzenie programów komputerowych do modelowani źródeł hałasu w celu predykcji wyniku oceny [70, 72]. Jednak żadne z tych narzędzi nie umożliwiło opracowania przyrządu – miernika jakości akustycznej wyrobu, ani nie wyeliminowało udziału testowej grupy słuchaczy. Dlatego też ocena jakości akustycznej wyrobu ze względu na składniki subiektywne stwarza problemy w zakresie powtarzalności i odtwarzalności badań [122]. Jednocześnie konieczność udziału testowej grupy słuchaczy w tym procesie uzasadnia systematycznie prowadzone prace dotyczące rozwoju technik związanych z badaniami psychoakustycznymi, w tym modyfikację ankiet między innymi w zakresie opisu subiektywnych wrażeń wywoływanych dźwiękami emitowanymi przez wyroby [14, 39, 42, 49, 63-65, 92].

Obok pojazdów samochodowych kolejną grupą wyrobów, dla której powszechnie określa się jakość akustyczną, jest sprzęt gospodarstwa domowego, a w szczególności chłodziarki, pralki, suszarki do włosów, odkurzacze, czajniki elektryczne oraz pompy i bojlery [10, 65, 66, 68, 75, 102, 141]. Przykładami wyników badań dla tych wyrobów są między innymi: propozycja stosowania (ze względu na stacjonarny w czasie charakter hałasu), podczas oceny jakości akustycznej chłodziarek, kurtozy jako miary rozkładu fluktuacji amplitudy fali akustycznej [103], wskaźników jakości akustycznej chłodziarek [68], w tym wskaźnika wykorzystującego sieci neuronowe [76], oraz matematycznego modelu umożliwiającego prognozowanie postrzegania przez słuchacza dźwięków emitowanych przez pralki [94].

Prowadzone są również prace dotyczące jakości akustycznej sprzętu komputerowego (w szczególności obiektem badań są wentylatory w komputerach oraz drukarki), kserokopiarek oraz urządzeń audio-video [51, 77, 81, 84, 88, 128]. Najnowszą grupą wyrobów poddawanych badaniom pod kątem jakości akustycznej są urządzenia medyczne oraz dzwonki alarmowe w szpitalach [102], a także przenośne maszyny trzymane w ręku lub prowadzone ręcznie

[53]. W badaniach tych, tak jak i we wcześniej opisanych, istotę stanowią dane pozyskiwane z badań psychoakustycznych. W przypadku badań wspomnianych maszyn przenośnych (wiertarek, wyrzynarek i pilarek łańcuchowych) grupa testowa osób dokonywała nie tylko oceny hałasu, lecz jednocześnie także innych cech maszyn, jak np. bezpieczeństwa uchwytu czy prawidłowości funkcjonowania maszyny [53].

Z przedstawionej analizy realizowanych prac w obszarze jakości akustycznej wyrobów wynika, że nie ma narzędzia, które zastąpiłoby badania psychoakustyczne z udziałem zespołu ekspertów (brakuje obiektywnej metody umożliwiającej prognozowanie wyniku oceny subiektywnej z odpowiednim stopniem dokładności). Udział zespołów ludzkich jest nie tylko źródłem problemów w zakresie powtarzalności i odtwarzalności, o czym wspomniano wcześniej, lecz także stanowi istotną przyczynę wydłużenia czasu realizacji badań nad oceną jakości akustycznej i znacząco zwiększa koszty tych badań. W związku z tym prowadzone są działania w kierunku uproszczenia metod oceny jakości akustycznej [16]. Tematem wielu prac badawczych jest także analiza kosztów [127, 129]. Zwiększanie poziomu jakości akustycznej wyrobu powoduje wzrost jego ceny, jednakże wielkość kosztów ponoszonych na poprawę jakości akustycznej zależy od etapu życia wyrobu, na którym te działania są podejmowane. Ogólną zależność w tym zakresie przedstawiono na rys. 2.1 [69].



Rys. 2.1. Zależność między kosztem oceny jakości akustycznej a poziomem tej jakości [69]

Zasadniczo można stwierdzić, że najważniejszą zasadą ze względów ekonomicznych jest podejmowanie adekwatnych działań dotyczących jakości akustycznej w odpowiednim czasie, w szczególności na etapie projektowania wyrobu. Im później będą realizowane te działania, tym większe koszty są związane z uzyskaniem wysokiego poziomu jakości akustycznej.

A zatem jakość akustyczna staje się produktem samym w sobie, szczególnie w państwach o bardzo silnej konkurencji rynkowej. Wyrób emitujący dźwięki, które nie są akceptowane przez klienta, spotyka się ze zmniejszonym popytem. Dlatego też wprowadzanie zagadnień z dziedziny psychoakustyki w procesie konstruowania wyrobów stało się niezbędne. Dźwięk emitowany przez wyrób jest ważnym elementem komunikacji między wyrobem a użytkownikiem. Powinien więc być przyjemny, a zarazem odzwierciedlać funkcjonalność i wydajność wyrobu – ma wskazywać na jego poprawną pracę, a także sygnalizować sytuacje awaryjne [139]. Ocena efektu przyjemności przy odbiorze dźwięku jest subiektywna i zależy przede wszystkim od słuchacza. Zważywszy, że odbiorcy to grupa ludzi o różnych gustach i przyzwyczajeniach, jest to duże wyzwanie dla projektantów.

2.4. Cele badań i teza badawcza

Z przeprowadzonej w podrozdziale 2.3 analizy literatury wynika, że ani w Polsce, ani na świecie nie prowadzi się badań nad jakością akustyczną wyrobów bez udziału grup słuchaczy oceniających emitowane dźwięki. Zatem jakość akustyczna wyrobu jest dotychczas określana na podstawie informacji psychoakustycznych i zawiera zarówno składnik obiektywny jak i subiektywny odbioru wrażeń słuchowych. Jednocześnie zdecydowana większość wyrobów podlegających ocenie akustycznej to wyroby, które nie są wyposażeniem stanowisk pracy – wyjątek stanowi jedynie sprzęt komputerowy oraz maszyny prowadzone ręcznie, poddane zainicjowanym ostatnio pionierskim badaniom. Natomiast podstawowym wyrobem stosowanym w środowisku pracy jest maszyna, która zgodnie z dokumentami prawnymi [150, 157] jest zdefiniowana jako: *zespół, wyposażony lub przeznaczony do wyposażenia w mechanizm napędowy inny niż bezpośrednio wykorzystujący siłę mięśni ludzkich lub zwierzęcych, składający się ze sprzężo-*

nych części lub elementów, z których przynajmniej jeden wykonuje ruch, połączonych w całość mającą konkretne zastosowanie.

W związku z tym, głównym celem opisanych w niniejszej pracy badań jest opracowanie definicji pojęcia *jakości akustycznej maszyny*, odzwierciedlającego w sposób obiektywny zagrożenie hałasem powodowane przez maszynę w warunkach eksploatacyjnych. Sformułowane cele szczegółowe obejmują:

- **opracowanie nowego wskaźnika oceny akustycznej maszyny – globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny, służącego do liczbowego scharakteryzowania jej jakości akustycznej**
- **wykazanie, że jest możliwe wykorzystanie globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny zarówno do prognozowania hałasu w pomieszczeniach eksploatacyjnych maszyn, jak i do wspomagania właściwego rozmieszczenia maszyn oraz stanowisk pracy w tych pomieszczeniach ze względu na ograniczenie zawodowej ekspozycji na hałas.**

Biorąc pod uwagę wymienione cele, w pracy przyjęto tezę, że jakość akustyczna maszyny może być mierzona za pomocą jednoznacznie zdefiniowanego wskaźnika.

Do realizacji wyznaczonych celów przyjęto powyżej cytowaną definicję maszyny oraz założono, że na poziom jakości akustycznej maszyny mają wpływ działania podejmowane na poszczególnych etapach jej życia – począwszy od projektowania do zainstalowania. W związku z tym wśród warunków decydujących o pozytywnej ocenie jakości akustycznej można wyróżnić między innymi spełnienie wymagań określonych w regulacjach dotyczących oceny zgodności maszyn z wymaganiami zasadniczymi, jak również stosowanie zasad prośrodowiskowego projektowania wyrobu z uwzględnieniem zasad redukcji hałasu oraz spełnienie wymagań zapewnienia jakości w projektowaniu i produkcji oraz w badaniach akustycznych.

2.5. Definicja jakości akustycznej maszyny

Szczegółowa analiza literatury przedstawiona w podrozdziale 2.3 wykazała, że dotychczas nie zdefiniowano pojęcia jakości akustycznej maszyny, ani nie został opracowany wskaźnik jej jakości akustycznej umożliwiający ocenę akustyczną maszyny i prognozowanie emisji hałasu maszyny w warunkach eksploatacyjnych.

Jakość akustyczna wyrobu ma coraz większe znaczenie podczas oceny całkowitej jakości wyrobu. Atrakcyjność, a w konsekwencji cena i sprzedaż wyrobów takich jak pojazdy, sprzęt gospodarstwa domowego, sprzęt komputerowy, w coraz większym stopniu zależą od ich jakości akustycznej. Na tę jakość wpływa wiele czynników. Jednak prace prowadzone w zagranicznych ośrodkach naukowych dotyczą jedynie korelacji między subiektywnym postrzeganiem brzmienia wyrobu przez wybraną grupę osób oceniających a obiektywnymi parametrami charakteryzującymi emisję hałasu, i na tej podstawie jest klasyfikowana jakość akustyczna wyrobu.

Jeżeli natomiast weźmie się pod uwagę różne etapy życia maszyny, ich powiązania z różnymi modelami systemu zarządzania jakością (patrz rozdział 3.) oraz ocenę zgodności maszyn (omówioną w załączniku 1.), to można stwierdzić, że dotychczasowe prace nad jakością akustyczną wyrobu są zawężone do zakresu działań, w wyniku których projektant (lub producent) uzyskuje jedynie informacje o tym, czy emitowane przez wyrób dźwięki są pozytywnie postrzegane przez użytkowników. Działania te dotyczą, jak już zostało stwierdzone, jedynie niewielkiej grupy wyrobów i zasadniczo nie obejmują maszyn. Ponadto, dla użytkownika maszyny istotny jest jej hałas w warunkach pracy – czyli jakość akustyczna maszyny w warunkach eksploatacyjnych. Dlatego w tym opracowaniu proponuje się następującą definicję pojęcia jakości akustycznej maszyny: **jakość akustyczna maszyny w warunkach eksploatacyjnych jest to zbiór cech maszyny oraz pomieszczenia eksploatacyjnego, wpływających na poziom hałasu oddziałującego na osoby w tym pomieszczeniu. Jakość akustyczna maszyny może być sparametryzowana i osiągać wartości wysokie, jeśli poziom ciśnienia akustycznego na stanowisku pracy nie przekracza wartości dopuszczalnych, lub niskie, jeśli stwierdzone jest przekroczenie wartości dopuszczalnych hałasu.**

Jakość akustyczną można kształtować za pomocą zespołu zaplanowanych i systematycznie realizowanych działań w fazach projektowania, produkcji, instalowania i eksploatacji maszyny, których celem jest zapewnienie emisji odpowiednio niskiego poziomu dźwięku, niepowodującego zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy w pomieszczeniu eksploatacyjnym. Miarą jakości akustycznej maszyny jest globalny wskaźnik jakości akustycznej.

Zapewnienie wysokiej jakości akustycznej maszyny umożliwia stosowanie następujących zasad:

- projektowanie powinno się odbywać według reguł ekoprojektowania z uwzględnieniem metod redukcji hałasu
- na etapach projektowania i produkcji maszyny powinien być wdrożony system zarządzania jakością spełniający wymagania odpowiednich dokumentów normatywnych
- na etapach instalowania i eksploatacji maszyny należy uwzględniać zarówno wymagania określone w dokumentacji techniczno-ruchowej lub instrukcji użytkowania, jak i parametry pomieszczenia eksploatacyjnego oraz parametry akustyczne i lokalizacje pozostałych źródeł hałasu znajdujących się w tym pomieszczeniu.

3

Zapewnienie jakości w badaniach i ocenie akustycznej maszyn

3.1. Wprowadzenie

Istnieje wiele definicji jakości [60, 61, 134-136]. Za pierwsze doniesienia na temat jakości można uważać zapisy zawarte w pochodzącym z 1700 p.n.e. Kodeksie Hammurabiego, w którym określono kary dla budowniczych popełniających błędy jakościowe podczas pracy. Z kolei według niektórych źródeł pojęcie jakości jako pierwszy zdefiniował Platon, który twierdził, że jest to pewien stopień doskonałości.

Wraz z rozwojem przemysłu w XX wieku rosła świadomość wagi zagadnień związanych z jakością. Istotny rozwój tej tematyki nastąpił w Japonii po II wojnie światowej, kiedy to amerykański statystyk W.E. Deming oraz amerykański teoretyk zarządzania J. Juran po raz pierwszy, we współpracy z inżynierami japońskimi, wdrożyli system, który później nazwano zarządzaniem przez jakość – TQM (ang. *total quality management*) [134].

Pod koniec lat 50. ubiegłego wieku rozpoczęto prace normalizacyjne w dziedzinie systemów jakości. Coraz powszechniej postrzegano jakość w sposób szerszy niż tylko jakość końcowego wyrobu. Zintensyfikowano działania mające na celu zapobieganie błędom, a nie tylko ich wykrywanie. W konsekwencji tych działań w Stanach Zjednoczonych w 1959 r. został opracowany pierwszy standard MIL-Q-9858 *Wymagania programu jakości*, opisujący system zapewnienia jakości. W dokumencie tym określono wymagania stawiane dostawcom produktów dla armii USA. Dopiero w latach 70. ubiegłego wieku pojawiły się normy z zakresu jakości – brytyjskie, kanadyjskie i australijskie. Przełomem było opublikowanie w 1979 r. w Wielkiej Brytanii normy jako-

ściowej BS 5750 [163], która stanowiła bazę do opracowania międzynarodowych norm jakościowych z serii 9000. W tymże roku, właśnie w strukturach Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej ISO, rozpoczął działalność Komitet Techniczny ISO/TC 176 zajmujący się problematyką zarządzania i zapewnienia jakości. W wyniku prac tego Komitetu w 1986 r. została opublikowana pierwsza norma z rodziny ISO 9000 – międzynarodowa norma ISO 8402 *Zarządzanie jakością i zapewnienie jakości. Terminologia* [203]. W wyniku prac tego Komitetu opublikowano w 1987 r. kolejne trzy normy serii ISO 9000 [205-207], w których zawarto opisy trzech modeli systemu zapewnienia jakości:

- w projektowaniu, pracach rozwojowych, produkcji, instalowaniu i serwisie
- w produkcji, instalowaniu i serwisie
- w kontroli i badaniach końcowych.

W kolejnych latach, wraz z nowymi doświadczeniami, powyższa seria dokumentów ulegała nowelizacji. Pierwsza z tych nowelizacji, dokonana w 1994 r., koncentrowała się na pełnym ujęciu cyklu życia wyrobu – od określenia potrzeb przez klienta do chwili, gdy użytkuje on wyrób. W ramach drugiej, gruntownej nowelizacji (2000 r.) zbliżono systemy zarządzania jakością do zasad TQM. Ponadto wymienione trzy modele systemu zapewnienia jakości zastąpiono jednym modelem. W wyniku kolejnych prac normalizacyjnych podstawą dla systemów zarządzania jakością są obecnie następujące dwie normy opublikowane odpowiednio w latach 2008 i 2009: ISO 9001 [176] oraz ISO 9004 [177]. Pierwszy z tych dokumentów stanowi podstawę do certyfikacji systemów zarządzania jakością, natomiast drugi z nich należy traktować jako wytyczne dotyczące doskonalenia zarówno systemu zarządzania jakością jak i całej organizacji.

W oczywisty sposób rozwój systemu zapewnienia jakości i opracowywanie nowych dokumentów normalizacyjnych implikowało także ewolucję definicji jakości. Na przykład według niektórych z nich jakość jest: „tym co najlepsze w określonych warunkach dla klienta", „zestawem charakterystyk projektowych i wykonawczych wyrobu, które określają stopień, w jakim produkt spełni oczekiwania klienta", „dopasowaniem do użytkowania". Jedną z powszechniej przyjętych definicji podano w normie ISO 8402 [203] – „jakość jest to ogół właściwości obiektu wiążących się z jego zdolnością do zaspokojenia potrzeb stwier-

dzonych i oczekiwanych". Natomiast najnowsza definicja z 2005 r. [204] określa jakość jako „stopień, w jakim zbiór inherentnych właściwości spełnia wymagania". Przyjmuje się, że „właściwości" to cechy wyróżniające, zarówno jakościowe jak i ilościowe, natomiast „inherentny" oznacza tu „tkwiący w istocie czegoś, szczególnie jako stała właściwość". Z kolei „wymaganie" jest definiowane jako „potrzeba lub oczekiwanie, które zostało ustalone, przyjęte zwyczajowo lub jest obowiązkowe".

3.2. Ocena akustyczna maszyn

Do celów oceny akustycznej maszyn powinny być stosowane wielkości, które w sposób obiektywny charakteryzują emisję hałasu. W związku z tym do określania emisji hałasu maszyn są stosowane następujące wielkości podstawowe:

- poziom mocy akustycznej skorygowany charakterystyką częstotliwościową A, L_{WA}
- poziom ciśnienia akustycznego emisji skorygowany charakterystyką częstotliwościową A, L_{pA}, na stanowisku pracy (stanowisku operatora) lub w innym określonym miejscu
- inne wielkości zdefiniowane w normach lub przepisach prawnych.

Ponadto mogą być stosowane wielkości dodatkowe, obejmujące:

- powierzchniowy poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową A, $\overline{L}_{pAf}$, w pewnej odległości od maszyny
- szczytowy poziom ciśnienia akustycznego emisji skorygowany charakterystyką częstotliwościową C, $L_{pC\mathrm{peak}}$.

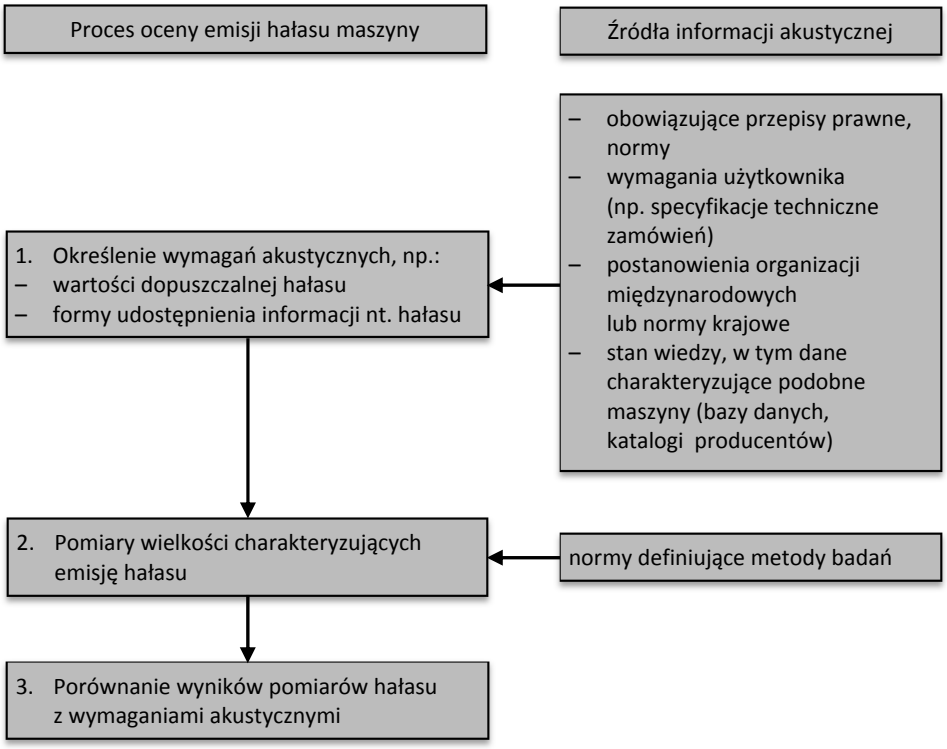
Dodatkowymi źródłami informacji przy określaniu emisji hałasu maszyn mogą być:

- widmo ciśnienia akustycznego (np. w pasmach 1/3-oktawowych) w wybranych punktach pomiarowych
- impulsywność
- współczynnik kierunkowości *Dl,* jeżeli jest to konieczne.

W procesie oceny emisji hałasu maszyn można wyróżnić trzy zasadnicze fazy postępowania. Pierwsza faza obejmuje ustalenie wymagań akustycznych, które mają zastosowanie do ocenianej maszyny. Wymagania te mogą określać maksymalne wartości parametrów charakteryzujących emisję hałasu (np. maksymalny poziom mocy akustycznej L_{WA} = 85 dB) lub jedynie definiować, które z tych parametrów i w jakich przypadkach powinny być dostępne w formie informacji dla użytkownika maszyny (np. wymaganie, że w instrukcji obsługi musi być zawarta informacja o wartości zmierzonego na stanowiskach pracy poziomu ciśnienia akustycznego emisji, skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A, a jeśli przekracza ona 80 dB, to dodatkowo musi być podana także wartość wyznaczonego poziomu mocy akustycznej A). Zazwyczaj wymagania akustyczne ustala się na podstawie obowiązujących przepisów prawnych i norm, lecz również można je określać za pomocą:

– wartości dopuszczalnych hałasu (lub zalecanych wartości dopuszczalnych hałasu) wymaganych przez nabywców maszyny i ustalonych np. w specyfikacjach technicznych zamówień
– wartości dopuszczalnych hałasu (lub zalecanych wartości dopuszczalnych hałasu) zawartych w postanowieniach organizacji międzynarodowych lub w normach krajowych
– wartości emisji podobnych maszyn wytwarzanych przez innych producentów, zmierzonych przez producentów, użytkowników, laboratoria pomiarowe itp., które mogą być uzyskane z dokumentacji maszyn, bazy danych lub podobnego zbioru informacji, gdzie można je uzyskać jako pojedyncze lub średnie wartości emisji hałasu.

Po zdefiniowaniu wymagań dotyczących wielkości charakteryzujących emisję hałasu maszyny należy przejść do fazy drugiej, czyli określić ich wartości. Ostatnią fazą oceny akustycznej jest porównanie uzyskanych wartości emisji hałasu z wcześniej zdefiniowanymi wymaganiami akustycznymi mającymi zastosowanie do danej maszyny i podjęcie decyzji, czy wymagania te są spełnione. Schemat blokowy procesu oceny emisji hałasu maszyny przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Fazy procesu oceny emisji hałasu maszyn

Elementy procesu oceny akustycznej maszyny (oceny emisji hałasu) zawarte są w procedurze oceny zgodności maszyn. Ocena zgodności jest definiowana jako proces, którego celem jest wykazanie, że wyspecjalizowane wymagania (które mogą być określone w dokumentach normatywnych, takich jak przepisy, normy i specyfikacje techniczne) dotyczące wyrobu, procesu, systemu, osoby lub jednostki zostały spełnione [201]. Zatem można stwierdzić, że ocena zgodności wyrobu polega na systematycznym badaniu stopnia, w jakim wyrób spełnia określone wymagania, między innymi wymagania bezpieczeństwa. Konieczne jest zatem ustanowienie przez państwo i wprowadzenie do stosowania odrębnych dokumentów dokładnie precyzujących wymagania bezpieczeństwa (kryteria oceny) dla poszczególnych wyrobów, a także określających obiektywne techniczne metody badań parametrów i czynników, które są związane z bezpieczeństwem użytkowania tych wyrobów.

W przypadku maszyn i urządzeń w grupie parametrów wiążących się z bezpieczeństwem użytkowania istotną rolę odgrywa emisja hałasu.

W załączniku 1. zamieszczono podstawowe informacje dotyczące procesu zgodności maszyn, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z oceną akustyczną maszyn prowadzoną w ramach tego procesu.

3.3. Zapewnienie jakości na etapie projektowania akustycznego i produkcji maszyn

Zagadnienia związane z bezpieczeństwem i ochroną zdrowia człowieka w środowisku pracy, z uwzględnieniem również zagrożeń związanych z narażeniem na hałas, można rozpatrywać poprzez analizę poszczególnych elementów oraz wzajemnych ich powiązań w układzie pracownik – środki techniczne – środowisko pracy. Środkami technicznymi są tu wszystkie środki techniczne stosowane przez pracownika w procesie pracy; znaczącą grupę stanowią maszyny i urządzenia produkcyjne.

W załączniku 1. opisano ogólne zasady oceny zgodności wyrobów ze szczególnym uwzględnieniem procedur dotyczących maszyn. Ocena ta jest w istotny sposób zdeterminowana przez dwa etapy życia maszyny, tj. projektowanie i produkcję, a więc przed etapem wprowadzania maszyny do obrotu handlowego. W konsekwencji, czynności realizowane w tych dwóch etapach mogą być spójne z wymaganiami dotyczącymi procesów systemu zarządzania jakością ujętymi w dokumencie [176]. Natomiast nie ma zasad związanych z jakościowym podejściem na etapach życia maszyny obejmujących zarówno jej instalowanie, jak i eksploatację oraz likwidację. Wymagania z zakresu systemów zarządzania jakością i oceny zgodności (w tym oceny akustycznej maszyny), sformalizowane w aktach prawnych i innych dokumentach, nie dotyczą etapów instalowania i eksploatacji oraz utylizacji. Korzystając z relacji między etapami życia maszyny a rodzajami i zakresami oceny zgodności [87, 117] w tab. 3.1 podano zależności między kolejnymi etapami życia maszyny a odpowiadającymi im zakresami oceny akustycznej.

Tabela 3.1. Zależność między kolejnymi etapami życia maszyny a odpowiadającymi im zakresami oceny akustycznej

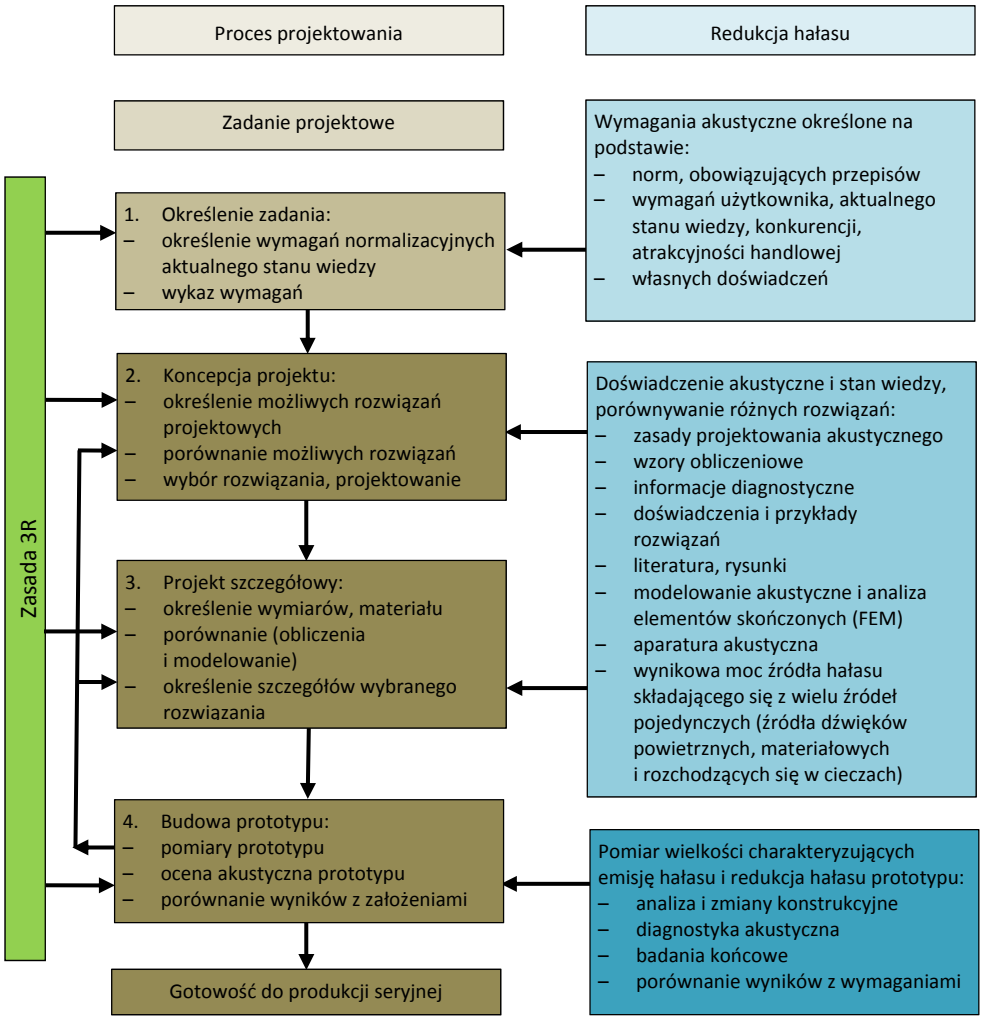
Etap życia maszyny	**Zakres oceny akustycznej maszyny**
Projektowanie	sprawdzanie dokumentacji technicznej pod względem zgodności parametrów technicznych maszyny z odpowiednimi wymaganiami akustycznymi przeprowadzane wewnętrznie przez projektanta/producenta zgodnie z odpowiednimi procedurami weryfikacji lub przez indywidualnego odbiorcę zamawiającego zaprojektowanie/wykonanie danych maszyn na własny użytek, a także sprawdzenie zgodności maszyn (przed wdrożeniem do produkcji i/lub wprowadzeniem do obrotu handlowego) z odpowiednimi wymaganiami akustycznymi przez badanie i ocenę parametrów akustycznych wybranych egzemplarzy maszyn w jednostkach badawczych i certyfikujących, niezależnych od producenta i odbiorcy
Produkcja	sprawdzanie zgodności parametrów akustycznych poszczególnych egzemplarzy maszyn z parametrami określonymi w dokumentacji technologicznej poprzez badania międzyoperacyjne i końcowe przeprowadzone przez producenta i/lub wyrywkowe badania akustyczne kontrolne maszyn przeprowadzone u producenta przez indywidualnego odbiorcę lub przez jednostkę kontrolną, niezależną od producenta i odbiorcy
Instalowanie i eksploatacja	sprawdzenie zgodności parametrów akustycznych maszyn wprowadzonych do użytkowania (u odbiorcy, po ich zakupie i ewentualnym zainstalowaniu) z parametrami określonymi w dokumentacji techniczno-ruchowej lub instrukcji użytkowania w ramach wstępnego uruchomienia (ewentualnie przez dodatkowe badania), a także okresowe sprawdzanie tej zgodności podczas przeglądów okresowych kwalifikujących maszyny do dalszej eksploatacji

Należy podkreślić, że metodyka projektowania maszyny (pierwszy etap jej życia) polega na wykorzystaniu informacji pochodzących z różnych dziedzin wiedzy, w tym akustyki maszyn. Ponadto niezmiernie ważne jest uwzględnienie w procesach projektowania aspektów środowiskowych, wynikających z zasad wprowadzonego także w Polsce rozwoju zrównoważonego,

definiowanego jako: *rozwój społeczno-gospodarczy, w którym następuje proces integrowania działań politycznych, gospodarczych i społecznych, z zachowaniem trwałości podstawowych procesów przyrodniczych, w celu zagwarantowania możliwości zaspokajania potrzeb poszczególnych społeczności, zarówno współczesnego pokolenia jak i pokoleń przyszłych* [93]. Natomiast podstawowym celem zrównoważonego rozwoju jest poprawa jakości życia, przez co rozumie się życie ludzi na odpowiednim poziomie społecznym w rozwiniętym środowisku, także przemysłowym, lecz równocześnie w zgodzie z przyrodą [31, 93]. Osiągnięcie tego celu wymaga stosowania w gospodarce krajowej wielu zasad, dotyczących między innymi oszczędnego gospodarowania naturalnymi zasobami (np. przez coraz większy udział odnawialnych źródeł energii w produkcji energii cieplnej i elektrycznej oraz w transporcie [125]) czy też prośrodowiskowego projektowania maszyn (ekoprojektowania). Projektowanie istotnie determinuje wielkość i charakter wpływu maszyny na środowisko podczas następnych etapów jej życia. W związku z tym w procesie projektowania, w celu zapewnienia ochrony środowiska, należy realizować zasadę 3R (ang. *reduce, reuse, recycle* – redukuj, użyj ponownie, poddaj recyklingowi) [125]. Na przykład wg pracy [11] zasada 3R w prośrodowiskowym projektowaniu polega na:

- doborze materiałów konstrukcyjnych pod kątem minimalizacji obciążenia środowiska w następstwie ich degradacji
- uwzględnieniu możliwości powtórnego użycia materiałów po zakończeniu eksploatacji maszyny, z czym wiąże się konieczność zapewnienia środowiskowego bezpieczeństwa procesu demontażu maszyny
- zagwarantowaniu wysokiej niezawodności maszyny podczas eksploatacji oraz możliwie małego zapotrzebowania na energię
- zapewnieniu trwałości konstrukcji maszyny, przystosowaniu do przeprowadzania napraw oraz podatności na diagnozowanie i obsługę
- zabezpieczeniu przed niekontrolowanym przenikaniem zanieczyszczeń i zakłóceń do otoczenia.

Uwzględniając wspomnianą zasadę 3R oraz metodykę projektowania opartą na metodach redukcji hałasu [189], autor proponuje dobre praktyki akustyczne w procesie projektowania maszyn o ograniczonym hałasie. Praktyki te można ująć w formie procedury ekoprojektowania akustycznego. Procedurę tę można podzielić na cztery fazy, w których następuje uściślenie zadań projektowych (rys. 3.2).



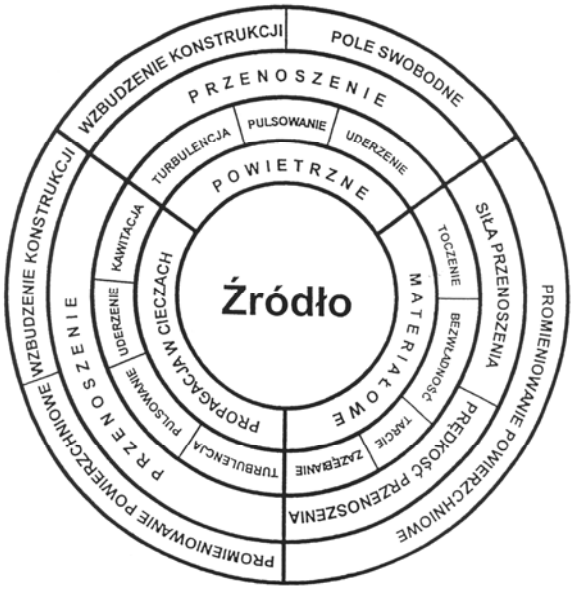
Rys. 3.2. Etapy procedury ekoprojektowania z uwzględnieniem metod redukcji hałasu [189] oraz zasady 3R

Systematyczne zwiększanie zbiorów informacji w kolejnych fazach projektu zapewnia uporządkowanie możliwych rozwiązań w stosunku do wymagań projektowych dotyczących uzyskania niskiego poziomu hałasu jak również jednoczesnego spełnienia zasady 3R. Zatem fazami ekoprojektowania akustycznego są:

1. Określenie zadania: w tej fazie opracowywany jest wykaz wymagań uwzględniający wymienioną zasadę 3R, będący dokumentem kontrolującym całe zadanie projektowe. Wykaz zawiera również wymagania dotyczące hałasu uwzględniające obowiązujące przepisy, aktualny stan wiedzy, wyroby konkurencyjne, wymagania użytkownika lub oceny hałasu maszyny jako zalety w sensie handlowym.
2. Koncepcja projektu: ta faza procesu projektowania koncentruje się głównie na osiągnięciu żądanych celów. Na tym etapie ilość informacji na temat wyrobu finalnego jest jeszcze ograniczona, dlatego charakterystyka akustyczna oraz skuteczność uwzględnienia zasady 3R są zazwyczaj oceniane przez porównanie ze znanymi rozwiązaniami.
3. Projekt szczegółowy: w miarę postępu prac projektowych i wyboru materiałów konstrukcyjnych pod kątem minimalizacji obciążenia środowiska w następstwie ich degradacji można dokonać ilościowej oceny charakterystyki akustycznej przez właściwą selekcję możliwych rozwiązań spełniających zasadę 3R.
4. Budowa prototypu: przeprowadzenie badań akustycznych prototypu maszyny umożliwiających ilościowe określenie głównych źródeł hałasu i dróg propagacji dźwięku. Badania te mogą wskazać na konieczność wprowadzenia zmian projektowych lub potwierdzić spełnienie wymagań, w tym akustycznych oraz wynikających z zasady 3R (w szczególności w zakresie zabezpieczenia przed niekontrolowaną emisją hałasu do otoczenia).

Priorytetowym zadaniem w procesie redukcji hałasu jest identyfikacja jego źródeł. Dlatego zarówno na etapie koncepcji projektu, jak i w fazie projektu szczegółowego jednym z istotnych narzędzi jest modelowanie akustyczne. Charakterystyka akustyczna maszyny zawierającej różne źródła hałasu może być przedstawiona za pomocą jej akustycznego modelu. W celu opracowania modelu należy podzielić maszynę na aktywne i pasywne źródła hałasu. Takie źródła mogą wytwarzać, przenosić i wypromieniowywać hałas powietrzny, hałas w cieczach i dźwięki materiałowe. Dlatego niezbędna jest analiza tych trzech rodzajów źródeł hałasu. Celem podziału źródeł hałasu jest identyfikacja źródeł dominujących, dróg przenoszenia oraz powierzchni promieniujących hałas. Następnie dokonuje się analizy dróg rozchodzenia się hałasu. Należy

wziąć pod uwagę hałas rozchodzący się w ośrodku stałym, ciekłym i gazowym. Dodatkowo należy rozważyć możliwość bezpośredniego promieniowania hałasu powietrznego przez poszczególne źródła aktywne oraz zidentyfikować powierzchnie maszyny promieniujące hałas. Po zidentyfikowaniu głównych źródeł hałasu i związanych z nimi dróg przenoszenia dźwięku niezbędne jest dokonanie analizy parametrów procesu. Przede wszystkim należy ocenić udział dominujących źródeł hałasu. Ogólnie zaleca się wykonać to przed oceną dróg przenoszenia dźwięku i analizą powierzchni promieniujących dźwięk. Na rys. 3.3 zilustrowano wzajemne powiązania różnych mechanizmów powstawania hałasu (różne źródła hałasu są przedstawione w pierwszych dwóch pierścieniach wewnętrznych).



Rys. 3.3. Podstawowy model generowania hałasu maszyn wg [189]

Wytworzony hałas jest następnie przenoszony przez jeden z ośrodków wymienionych w pierścieniu pierwszym. Ostatecznie hałas jest wypromieniowywany w przestrzeń powietrzną lub pobudza konstrukcję do drgań. Każde źródło dźwięku ma własną charakterystykę, specyficzną drogę przenoszenia przez konstrukcję i pobudza do drgań powierzchnie promieniujące energię akustyczną. Zapewnienie redukcji hałasu maszyny zawierającej wiele różnych

typów źródeł wymaga osobnej analizy każdego źródła hałasu, drogi przenoszenia oraz powierzchni promieniującej energię.

Zatem ogólne zasady projektowania można ująć następująco:

- podzielić maszyny na źródła pierwotne i wtórne
- zlokalizować źródła hałasu powietrznego, hałasu w cieczy i dźwięków materiałowych
- zlokalizować drogi propagacji hałasu powietrznego, hałasu w cieczy i dźwięków materiałowych
- zlokalizować powierzchnie promieniujące dźwięk
- zidentyfikować najsilniejsze składowe (źródła, drogi przenoszenia, powierzchnie promieniujące dźwięk).

Ponieważ mechanizmy generacji i propagacji dźwięku w maszynach i urządzeniach są złożone, więc wskazane jest sporządzenie prostych modeli akustycznych. Modele są podstawą do uwzględniania środków redukcji hałasu na określonych etapach projektowania. Modelowanie może być realizowane za pomocą elementarnych źródeł dźwięku o znanych charakterystykach, tj.:

- monopoli
- dipoli
- kwadropoli.

Kolejny etap życia wyrobu (maszyny) – produkcja – podobnie jak projektowanie, może się odbywać zgodnie z wymaganiami dotyczącymi systemu zarządzania jakością. Producent maszyny na etapie produkcji musi zapewnić między innymi [176]:

- nadzorowanie produkcji poprzez:
  - dostępność informacji, w których określono właściwości wyrobu
  - dostępność instrukcji pracy, jeśli są niezbędne
  - stosowanie właściwego wyposażenia
  - dostępność i stosowanie wyposażenia do monitorowania i pomiarów
  - wdrożenie monitorowania i pomiarów
- walidację procesów produkcji poprzez:
  - określone kryteria dotyczące przeglądu i zatwierdzenia procesów
  - zatwierdzenie wyposażenia i kwalifikowanie personelu
  - stosowanie określonych metod i procedur
  - wymagania dotyczące zapisów

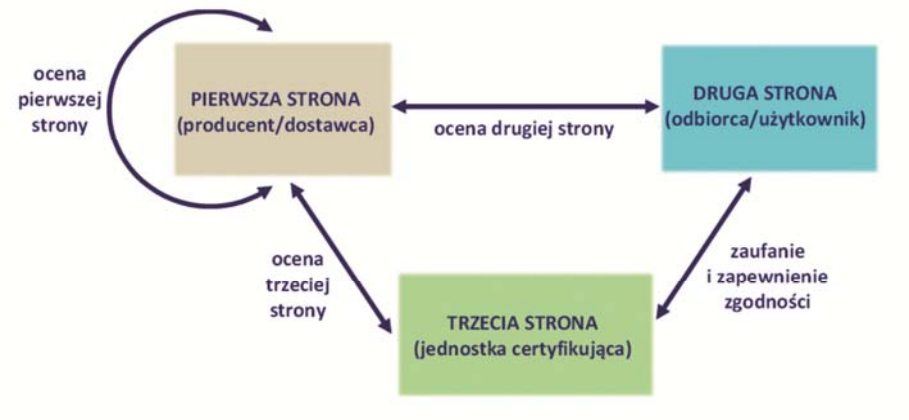
- identyfikację wyrobu za pomocą stosownych środków przez cały czas jego realizacji, w tym identyfikację statusu wyrobu w odniesieniu do wymagań dotyczących monitorowania i pomiarów przez cały czas jego realizacji
- identyfikowanie, weryfikowanie, chronienie i zabezpieczanie własności klienta dostarczonej w celu użycia lub włączenia w wyrób
- zabezpieczanie wyrobu podczas wewnętrznego procesu przetwarzania i dostarczania do miejsca przeznaczenia, w celu utrzymania zgodności z wymaganiami
- nadzorowanie wyposażenia do monitorowania i pomiarów, które należy wykonać, oraz nadzorowanie wyposażenia do monitorowania i pomiarów potrzebnych do dostarczenia dowodu zgodności wyrobu z określonymi wymaganiami.

3.4. Zapewnienie jakości badań w ocenie akustycznej maszyn

Przedstawione w tab. 3.1 zakresy oceny akustycznej maszyny, stosowanej podczas etapów projektowania, produkcji i wprowadzania do obrotu handlowego, w zależności od podmiotu przeprowadzającego ocenę dzielą się na:

- ocenę pierwszej strony, którą przeprowadza bezpośrednio projektant (na etapie projektowania) lub producent maszyn (w toku produkcji)
- ocenę drugiej strony, którą przeprowadza bezpośredni odbiorca maszyn (na etapie projektowania i(lub) produkcji)
- ocenę trzeciej strony, którą przeprowadza jednostka niezależna od projektanta, producenta i odbiorcy maszyn (podczas produkcji w ramach wyrywkowych badań kontrolnych i(lub) na etapie wprowadzania maszyn do obrotu handlowego w ramach oceny typu).

Na rys. 3.4 przedstawiono schematyczne relacje między wymienionymi rodzajami certyfikacji [117].



Rys. 3.4. Relacje między stronami pierwszą, drugą i trzecią w ocenie akustycznej maszyn [117]

Certyfikacją nazywa się ocenę przeprowadzoną przez trzecią stronę przed wprowadzeniem maszyn do obrotu handlowego. Jest to procedura, w wyniku której trzecia strona udziela pisemnego zapewnienia, że wyrób jest zgodny z wymaganiami.

Wykonywanie zadań strony trzeciej na różnych etapach procedur oceny zgodności opisanych w załączniku 1. może być realizowane wyłącznie przez jednostki notyfikowane. W przypadku realizacji badań są to laboratoria badawcze spełniające wymagania określone w normie ISO/IEC 17025 [202]. Zatem wyznaczenie, w ramach procesu oceny zgodności, parametrów charakteryzujących emisję hałasu maszyny do celów oceny akustycznej (patrz podrozdział 3.2) wymaga udziału laboratorium badawczego, w którym ustanowiono i wdrożono system zarządzania jakością.

Takie laboratorium badawcze musi działać zarówno zgodnie z zasadami zarządzania, jak i uwzględniać aspekty techniczne. W przypadku tych pierwszych istotnym elementem jest system zarządzania jakością, obejmujący między innymi politykę jakości oraz księgę jakości. W ramach tych wymagań zdefiniowane są obowiązki laboratorium dotyczące nadzoru nad dokumentami stanowiącymi składniki systemu zarządzania jakością, podwykonawstwa badań, zakupu usług, obsługi klienta, postępowania ze skargami, nadzoru nad niezgodnymi badaniami, realizowania działań korygujących i zapobiegawczych oraz przeprowadzania audytów wewnętrznych i przeglądów zarządzania.

Z kolei wymagania techniczne dotyczą:

- personelu
  Należy zapewnić, aby każdy, kto obsługuje określone wyposażenie, przeprowadza badania, ocenia wyniki i podpisuje sprawozdania z badań, miał udokumentowane kompetencje. W tym celu należy sformułować wymagania dotyczące wykształcenia, szkolenia i umiejętności personelu laboratorium.
- warunków lokalowych i środowiskowych
  Warunki w laboratorium, łącznie ze źródłami energii, oświetleniem i warunkami środowiskowymi, powinny być takie, aby umożliwić prawidłowe przeprowadzanie badań. Laboratorium powinno monitorować, nadzorować i rejestrować warunki środowiskowe zgodnie z wymaganiami określonych specyfikacji, metod badań oraz powinno zapewnić, że warunki środowiskowe nie spowodują unieważnienia wyników ani nie wpłyną ujemnie na wymaganą jakość pomiarów.
- metod badań i ich walidacji
  Należy stosować metody badań, łącznie z metodami pobierania próbek, które spełniają wymagania klienta i są właściwe do badań, których wykonania się podjęto. Ponadto powinno się preferować stosowanie metod opublikowanych w normach międzynarodowych, regionalnych lub krajowych. Natomiast, jeżeli zachodzi potrzeba stosowania metod nieznormalizowanych, to powinny być one właściwie zwalidowane przed zastosowaniem.
- szacowania niepewności pomiarów
  Wymagane jest posiadanie i stosowanie procedury szacowania niepewności pomiaru. Podczas szacowania niepewności pomiaru należy wziąć pod uwagę wszystkie składniki niepewności, które są istotne w danej sytuacji, z wykorzystaniem właściwych metod analizy.
- wyposażenia pomiarowego i badawczego
  Wymagane jest, aby laboratorium było wyposażone we wszystkie elementy wyposażenia do pobierania próbek, pomiarów i badań, niezbędne do prawidłowego przeprowadzenia badań (łącznie z pobraniem próbek, przygotowaniem obiektów do badań, przetwarzaniem i analizą danych

z badania). Istotne jest, by wyposażenie to zapewniało wymaganą dokładność oraz spełniało specyfikacje dotyczące badań.

- zapewnienia spójności pomiarowej
  Całe wyposażenie używane do badań, w tym wyposażenie do pomiarów pomocniczych (np. warunków środowiskowych), które ma znaczący wpływ na dokładność lub miarodajność wyników badania, pobierania próbki, powinno być wzorcowane przed oddaniem do użytkowania. Laboratorium powinno stosować formalnie ustanowiony program oraz procedury wzorcowania swego wyposażenia.

- zasad pobierania próbek do badań
  Laboratorium powinno mieć plan pobierania próbek (oparty na metodach statystycznych) i procedury pobierania próbek uwzględniające czynniki, które należy nadzorować, aby zapewnić miarodajność wyników badań.

- zapewnienia jakości badań
  Zapewnienie jakości wyników badań osiągane jest poprzez:
  - udział w programach porównań międzylaboratoryjnych lub programach badania biegłości
  - powtarzanie badań z wykorzystaniem tych samych lub innych metod
  - powtórne badanie przechowywanych obiektów
  - korelację wyników dotyczących różnych właściwości obiektu.

- przedstawienia wyników badań
  Wyniki każdego badania, albo serii badań wykonanych przez laboratorium, powinny być podane dokładnie, jasno, jednoznacznie i obiektywnie, a także zgodnie z wszystkimi określonymi instrukcjami zawartymi w metodach badań.

- postępowania z obiektami do badań
  Wymaga się również, aby laboratorium miało i stosowało procedury dotyczące transportowania, przyjmowania i postępowania z obiektami podlegającymi badaniu oraz ich zabezpieczania, magazynowania, przetrzymywania i/lub pozbywania się, zawierające także opis wszystkich warunków niezbędnych do ochrony całości obiektu badania oraz ochrony interesów laboratorium i klienta.

4

Wskaźniki oceny akustycznej maszyn

4.1. Wprowadzenie

Jednym z czynników fizycznych występujących we wnętrzu hali przemysłowej jest hałas, a minimalizowanie narażenia na hałas jest istotnym elementem kształtowania właściwego klimatu akustycznego w środowisku pracy. Problem oceny i kształtowania właściwych warunków akustycznych w halach przemysłowych ma duże znaczenie praktyczne dla ochrony środowiska pracy i jest jednym z wyznaczników ograniczenia lub likwidacji zagrożeń hałasowych na stanowiskach pracy znajdujących się w tych pomieszczeniach. Sposobem na rozwiązanie tego problemu jest zastosowanie analizy modelowej pola akustycznego w halach z uwzględnieniem ich kształtów, realizowanych w nich procesów technologicznych, lokalizacji stanowisk pracy i warunków kombinacji rozmieszczeń i współdziałania różnych źródeł zagrożenia hałasem. Podstawowym parametrem wejściowym do analizy pola jest znajomość parametrów akustycznych maszyn zainstalowanych w pomieszczeniu przemysłowym. Potrzeby projektowe akustycznego bezpieczeństwa stanowisk pracy wymuszają ciągłe doskonalenie reguł prezentacji wyników badań modelowych i eksperymentalnych oraz poszukiwanie sposobów syntetycznego przedstawienia jakości akustycznej maszyn i hal przemysłowych za pomocą określonego typu wskaźników służących do oceny ryzyka zawodowego wynikającego z narażenia pracowników na hałas.

Każda maszyna, urządzenie oraz pomieszczenie produkcyjne podlega ostatecznej weryfikacji w czasie użytkowania, jednakże ocena jest konieczna już w fazie projektowania, a przede wszystkim po zakończeniu projektu wstępnego. Jednym z ważnych składników określających prawidłowe ukształtowanie wnętrza hali przemysłowej jest jej klimat akustyczny.

Klimat akustyczny środowiska pracy określa zespół zjawisk akustycznych zachodzących w tym środowisku, spowodowanych hałasem. Najczęściej jest określany za pomocą grupy wskaźników podawanych jako funkcja częstotliwości, czasu i przestrzeni. Można przyjąć, że klimat akustyczny, K_A, jest funkcją f_1 klimatów cząstkowych [29]:

$$K_A = f_1(K_{A_1}, K_{A_2}, ..., K_{A_n}), \text{ dB} \tag{4.1}$$

gdzie:

K_{A_1}, K_{A_2}, ..., K_{A_n} – klimaty cząstkowe, wytworzone przez poszczególne źródła hałasu, w dB.

Z kolei każdy klimat cząstkowy, K_{A_i} *(i = 1,...., n)*, w danym punkcie zależy od poziomu hałasu wytwarzanego przez *i*-te źródło, tzn.:

$$K_{A_i} = f_2(L_{H_i}, C_i), \text{ dB} \tag{4.2}$$

gdzie:

L_{H_i} – poziomy ciśnienia akustycznego (lub poziomy mocy akustycznej) kolejnych źródeł hałasu danej grupy w określonym punkcie obserwacji, w dB

C_i – parametr charakteryzujący czynniki na drodze między *i*-tym źródłem hałasu a danym punktem, wpływające na poziom hałasu w tym punkcie.

Zatem klimat akustyczny w danym punkcie tworzą fale akustyczne docierające od wszystkich źródeł hałasu w sposób bezpośredni oraz fale akustyczne rozproszone i ugięte na obiektach znajdujących się w pomieszczeniu. Ponieważ jakość klimatu akustycznego charakteryzuje równoważny poziom dźwięku A, to pierwotny klimat akustyczny, K_A, w pomieszczeniu eksploatacyjnym – w miejscu, którym będzie zlokalizowane stanowisko pracy – można wyrazić poprzez równoważny poziom dźwięku A, L'_{Aeq}. Dlatego, określając wartość tego poziomu przed zainstalowaniem maszyny, uwzględnia się dźwięki docierające od wszystkich źródeł hałasu, zarówno drogą bezpośrednią jak i pośrednią, oraz dźwięki rozproszone i ugięte.

Dalej scharakteryzowano opracowane przez autora wskaźniki oceny akustycznej maszyn, z wyjątkiem globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny, który omówiono odrębnie w rozdziale 6.

4.2. Wskaźnik energetyczny i wskaźnik emisyjny

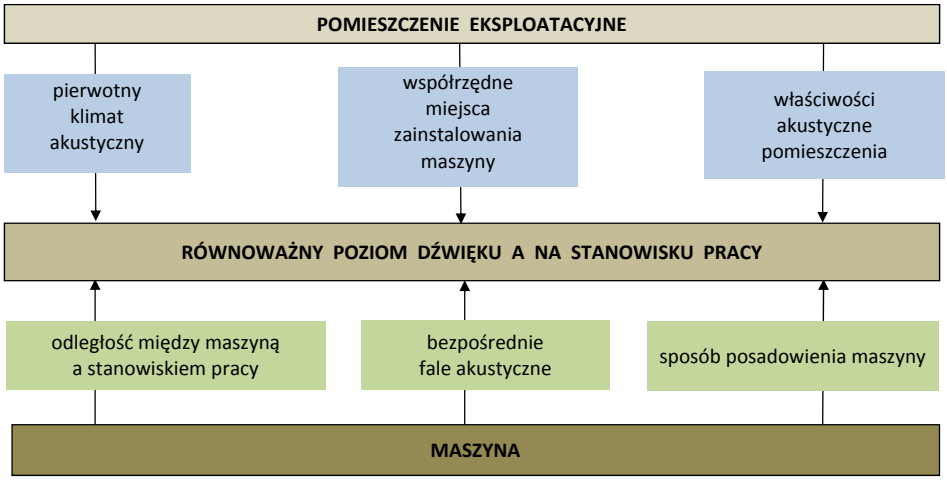
Przeprowadzana ocena akustyczna maszyny w ramach procedury oceny zgodności (patrz załącznik 1.) nie dostarcza potencjalnemu użytkownikowi maszyny kompletnej informacji o tym, czy maszyna będzie bezpieczna akustycznie (tzn., czy nie będzie przekroczona wartość dopuszczalna poziomu hałasu na stanowiskach pracy) w warunkach eksploatacyjnych.

O szkodliwym wpływie hałasu na narząd słuchu decydują następujące cechy hałasu i okoliczności narażenia [120]:

- równoważny poziom dźwięku A
- czas działania hałasu
- ciągła ekspozycja na hałas (bardziej szkodliwa niż przerywana)
- impulsowy charakter hałasu
- widmo hałasu z przewagą bardziej szkodliwych składowych o częstotliwościach średnich i wysokich
- szczególna, osobnicza podatność organizmu człowieka na uszkadzający wpływ hałasu.

Skupiając się na pierwszym, a zarazem najbardziej decydującym o szkodliwym oddziaływaniu hałasu parametrze, tzn. równoważnym poziomie dźwięku A na stanowisku pracy w warunkach eksploatacyjnych, można przyjąć, że na jego wartość mają wpływ zarówno parametry charakteryzujące źródło hałasu, czyli maszynę, jak i parametry charakteryzujące pomieszczenie eksploatacyjne (rys. 4.1) [21, 115]. Zgodnie z rys. 4.1 wartość równoważnego poziomu dźwięku A na stanowisku pracy zależy od:

- pierwotnego klimatu akustycznego w pomieszczeniu eksploatacyjnym
- właściwości akustycznych charakteryzujących pomieszczenie eksploatacyjne
- miejsca ustawienia i sposobu posadowienia maszyny w pomieszczeniu
- odległości między maszyną a stanowiskiem pracy
- intensywności bezpośrednich fal akustycznych, charakteryzowanej np. mocą akustyczną.



Rys. 4.1. Parametry wpływające na wartość równoważnego poziomu dźwięku A na stanowisku pracy w pomieszczeniach eksploatacyjnych [21, 115]

Wskaźnik energetyczny oceny akustycznej maszyny, W_E [21, 24, 108-110], zainstalowanej w określonych warunkach eksploatacyjnych dla obowiązującej wartości dopuszczalnej równoważnego poziomu dźwięku A na stanowisku pracy, określa zależność (4.3):

$$W_E = 10\log\frac{1}{\sum_{i=1}^{k}\Delta t_i}\left(\sum_{i=1}^{k}\Delta t_i 10^{0,1L_{WA_i}}\right) - 10\log\frac{10^{0,1L_{Aeqd}} - 10^{0,1L'_{Aeq}}}{\frac{Q}{4\pi d^2}+\frac{4}{A}}, \qquad (4.3)$$

gdzie:

Δt_i – czas trwania i-tego wariantu pracy maszyny, w s

L_{WA_i} – skorygowany poziom mocy akustycznej A maszyny w jej i-tym wariancie pracy, w dB

L_{Aeqd} – wartość dopuszczalna równoważnego poziomu dźwięku A na stanowisku pracy, w dB

d – odległość stanowiska pracy od ocenianej maszyny, w m

Q – współczynnik promieniowania maszyny

L'_{Aeq} – wartość równoważnego poziomu dźwięku A w miejscu stanowiska pracy przed zainstalowaniem maszyny („klimat akustyczny pierwotny"), w dB

A – chłonność akustyczna pomieszczenia, w m^2.

Maszyna jest bezpieczna akustycznie, jeżeli wartość wskaźnika energetycznego jest mniejsza lub równa 0 dB (tzn. $W_E \leq 0$). Jeżeli wartość tego wskaźnika jest dodatnia ($W_E > 0$), maszyna jest niebezpieczna akustycznie, tzn. równoważny poziom dźwięku A na stanowisku pracy związanym z tą maszyną przekracza obowiązujące wartości dopuszczalne.

Alternatywnym wskaźnikiem oceny akustycznej maszyn i urządzeń jest wskaźnik emisyjny [21, 24, 109, 110] wyrażony zależnością (4.4):

$$W_I = 10\log\left(\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{N} T_{\mathrm{i}} \cdot 10^{0{,}1L_{p,T(i)}}\right) - 10\log\frac{10^{0{,}1L_{Aeqd}} - 10^{0{,}1L'_{Aeq}}}{1+\dfrac{8\pi d^2}{A}}, \tag{4.4}$$

gdzie:

N – liczba cząstkowych przedziałów czasu $T = \sum_{i=1}^{N} T_i$, w s

Δt_i – czas trwania i-tego wariantu pracy maszyny, w s

$L_{p,T(i)}$ – poziom ciśnienia akustycznego emisji w cząstkowym przedziale czasu T_i, w dB

L_{Aeqd} – wartość dopuszczalna równoważnego poziomu dźwięku A na stanowisku pracy, w dB

d – odległość stanowiska pracy od ocenianej maszyny, w m

L'_{Aeq} – wartość równoważnego poziomu dźwięku A w miejscu stanowiska pracy przed zainstalowaniem maszyny („klimat akustyczny pierwotny"), w dB

A – chłonność akustyczna pomieszczenia, w m^2.

Maszyna jest bezpieczna pod względem akustycznym, jeżeli wartość wskaźnika emisyjnego W_I jest mniejsza bądź równa 0 ($W_I \leq 0$), a wartość dodatnia wskaźnika ($W_I > 0$) oznacza, że maszyna jest niebezpieczna akustycznie, tzn. równoważny poziom dźwięku A na stanowisku pracy w warunkach eksploatacyjnych przekracza obowiązującą wartość dopuszczalną.

4.3. Wskaźniki promieniowania i przeniesienia energii

Jednym z elementów opisanej w podrozdziale 3.3 procedury ekoprojektowania jest sporządzanie prostych modeli akustycznych, będących podstawą

do efektywnego uwzględniania środków redukcji hałasu. W modelowaniu akustycznym maszyn ważnym elementem jest wyznaczanie mocy akustycznej promieniowanej i przenoszonej przez struktury. Przede wszystkim ma to związek z wykorzystaniem metod pomiarowych i obliczeniowych opartych na stosowaniu miar energetycznych, takich jak natężenie dźwięku i moc akustyczna przenoszona w danym układzie lub promieniowana do otoczenia.

Relację między mocą akustyczną obiektu a drganiami strukturalnymi opisuje efektywność promieniowania, σ, określona wzorem (4.5) [20, 190]:

$$\sigma = \frac{W}{\rho c S \tilde{v}^2} \tag{4.5}$$

gdzie:

W – wyemitowana moc akustyczna, w W

$\tilde{v}$ – średnia prędkość powierzchni promieniującej, w m/s

ρ – gęstość powietrza, w kg/m^3

c – prędkość dźwięku w powietrzu, w m/s

S – pole powierzchni promieniowania, w m^2.

Korzystając z zależności (4.5), autor zaproponował wprowadzenie wskaźnika promieniowania energii, *WRD*, określonego jako [112, 113]:

$$WRD = 10\log\frac{W}{W_0} + 10\log\frac{W_0}{\rho c S_0 \tilde{v}_0^2} - 10\log\frac{S}{S_0} - 10\log\frac{\tilde{v}^2}{\tilde{v}_0^2} \tag{4.6}$$

gdzie:

$S_0 = 1$ m^2

$v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s

$W_0 = 10^{-12}$ W.

Zatem wskaźnik promieniowania energii, *WRD*, można określić jako różnicę między poziomem mocy akustycznej źródła i poziomem prędkości drgań powierzchni promieniującej:

$$WRD = L_W - L_v - 10\log\left(\frac{S}{S_0}\right) \tag{4.7}$$

gdzie:

L_W – poziom mocy akustycznej źródła, w dB

L_v – poziom prędkości drgań powierzchni promieniującej, w dB.

Wskaźnik promieniowania, *WRD,* podobnie jak sprawność promieniowania, σ, jest wielkością opisującą zdolność struktury, która jest pobudzona dźwiękiem materiałowym, do wypromieniowania dźwięku do otoczenia i zawiera informację o jednorodności rozkładu prędkości drgań na powierzchni drgającej struktury (elementu maszyny) [20]. W wyniku zakłócenia tej jednorodności dochodzi do zmniejszenia emitowanej energii wibroakustycznej. Można ten efekt uzyskać między innymi przez wzmocnienie, usztywnienie (dodatkowe użebrowanie [20]). Również każda zmiana wymiarów elementów, naruszenie spójności poprzez perforację prowadzi do zmniejszenia poziomu emitowanego dźwięku przez drgające struktury [20].

Należy zauważyć, że wykorzystanie wartości poziomów mocy akustycznej, ciśnienia i prędkości drgań daje bardzo prostą i łatwą do zastosowania zależność wynikającą ze związku równania (4.7) i wzoru określającego poziom mocy akustycznej (4.8):

$$L_W = L_p + 10\log\frac{A}{4} \tag{4.8}$$

gdzie:

L_p – poziom ciśnienia akustycznego, w dB

A – chłonność akustyczna pomieszczenia, w m^2.

Wówczas:

$$WRD = L_p - L_v + 10\log\left(\frac{A}{4S}\right) \tag{4.9}$$

Zależność ta wskazuje, że można wyznaczyć wskaźnik promieniowania energii, *WRD,* dla badanego źródła przez pomiar średniego poziomu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu pogłosowym i poziomu prędkości na powierzchni promieniującej oraz określenie chłonności akustycznej lub czasu pogłosu pomieszczenia.

Z kolei zdolność określonej struktury do przeniesienia energii akustycznej do innej, złączonej z nią struktury, jest określona współczynnikiem przeniesienia energii. Każdy sposób połączenia dwóch struktur bądź oddziaływania ośrodków cechuje odmienna charakterystyka współczynnika przeniesienia energii. W przypadku przepływów energii akustycznej między ośrodkiem płynnym i stałym współczynnik opisuje sposób ich wzajemnego oddziaływania.

Wyznaczenie drogą eksperymentalną współczynnika przeniesienia energii wymaga oceny średniej wartości kwadratów prędkości drgań na powierzchniach płyt, znajomości gęstości materiału jak również rodzaju połączenia.

Dla fali płaskiej biegnącej w jednym kierunku zależność między naprężeniem (bądź ciśnieniem) a prędkością cząstki, v, jest określona wzorem (4.10):

$$Z = \frac{\sigma}{v} = \rho c \tag{4.10}$$

gdzie:

Z – impedancja akustyczna falowa, w kg/(m^2 · s)

σ – naprężenie, w N/m^2

v – prędkość cząstki, w m/s

ρ – gęstość ośrodka, w kg/m^3

c – prędkość fali, w m/s.

Natomiast wartość współczynnika przenikania akustycznego, γ [142], podczas przejścia przez granicę dwóch ośrodków, nr 1 i nr 2, określa zależność (4.11):

$$\gamma = \frac{4Z_1Z_2}{\left(Z_2 + Z_1\right)^2} \tag{4.11}$$

gdzie:

Z_1 i Z_2 – impedancje akustyczne falowe ośrodków nr 1 i nr 2, w kg/(m^2 · s).

Wykorzystując tę zależność, autor określił wskaźnik przeniesienia energii akustycznej między dwoma ośrodkami, *WTR* [112, 113]:

$$WTR = \mathrm{S}\gamma = -10\log \mathrm{S}\gamma \tag{4.12}$$

gdzie:

S – pole powierzchni styku dwóch ośrodków, w m^2.

Wskaźnik przeniesienia energii wibroakustycznej jest obliczany jako stosunek energii elementu odbierającego do energii elementu przekazującego. W ten sposób można wyznaczyć wskaźniki przeniesienia energii w zależności od częstotliwości dla poszczególnych elementów maszyny jako stosunki energii elementu odbierającego i przekazującego. Energię ruchu drgającego można wyznaczyć z zależności:

$$E_i = m_i \left\langle v_i^2 \right\rangle, \mathrm{J} \tag{4.13}$$

gdzie:

$\left\langle v_i^2 \right\rangle$ – uśredniony kwadrat wartości skutecznej prędkości drgań *i*-tego elementu, w m^2/s^4

m_i – masa *i*-tego elementu, w kg.

Zatem wskaźnik przeniesienia energii, *WTR*, określa się z zależności (4.14):

$$WTR = 10 \log \frac{E_i}{E_j}, \mathrm{dB} \tag{4.14}$$

gdzie:

E_i, E_j – energie stykających się elementów maszyny, w J.

Dla mierzonych wartości poziomów przyspieszeń drgań powierzchni lub poziomów prędkości drgań powierzchni badanych elementów wskaźnik przeniesienia energii *WTR* można wyznaczyć z zależności (4.15):

$$WTR = L_{vi} - L_{vj} + 10 \log \frac{m_i}{m_j} \tag{4.15}$$

gdzie:

m_i, m_j – masy stykających się elementów maszyny, w kg

L_{vi}, L_{vj} – poziomy prędkości drgań stykających się elementów maszyny, w dB.

W rozdziale 5. zamieszczono przykładowe wartości wskaźników promieniowania i przeniesienia energii wyznaczone podczas badań eksperymentalnych.

5

Metoda inwersji w badaniach procesów wibroakustycznych

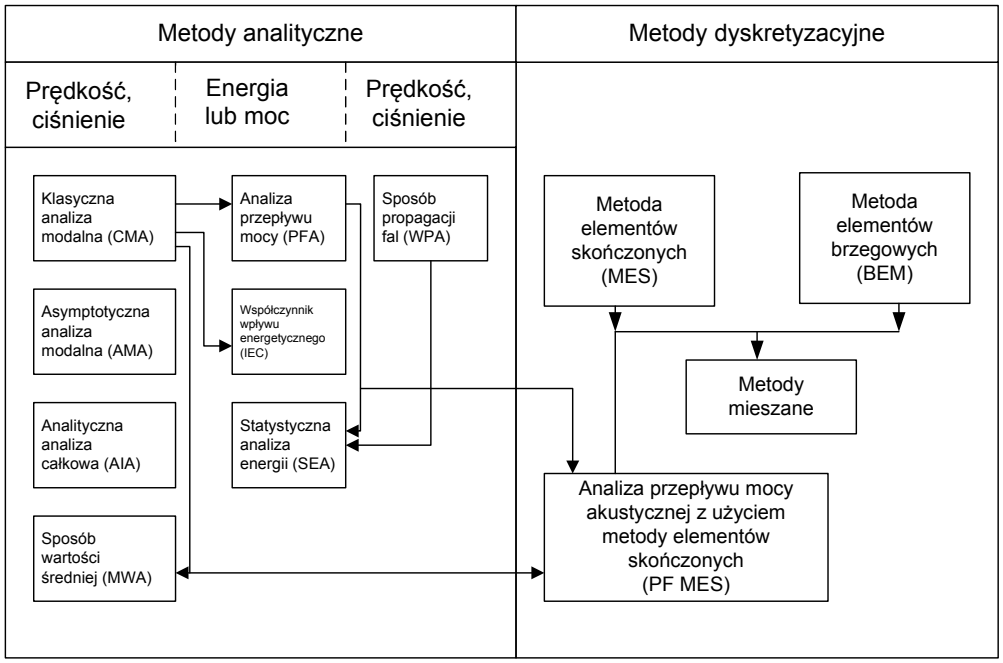
5.1. Wprowadzenie

W analizie procesów wibroakustycznych uwzględnia się następujące zagadnienia [21]:

- czasowy i przestrzenny rozkład charakterystyki opisującej energię pochodzącą ze źródła
- odpowiedź układu, wibroakustyczną funkcję przejścia
- zależność między źródłami.

Analiza ta i towarzyszące jej procedury badania procesu wibroakustycznego są na ogół bardzo skomplikowane. Wyjątek stanowią metody znormalizowane, które można zaliczyć do prostych metod badań procesów wibroakustycznych. Stosowane są one do oceny akustycznej maszyn w ramach realizacji procedur oceny zgodności i dotyczą wyznaczania poziomu ciśnienia akustycznego emisji w określonym miejscu w pobliżu maszyny oraz określenia poziomu mocy akustycznej. Klasyfikacja tych metod została przedstawiona w załączniku 1. (podrozdział Z.2.2).

Pozostałe metody wykorzystywane w badaniach procesów wibroakustycznych dzielą się na analityczne i dyskretyzacyjne (rys. 5.1) [21].

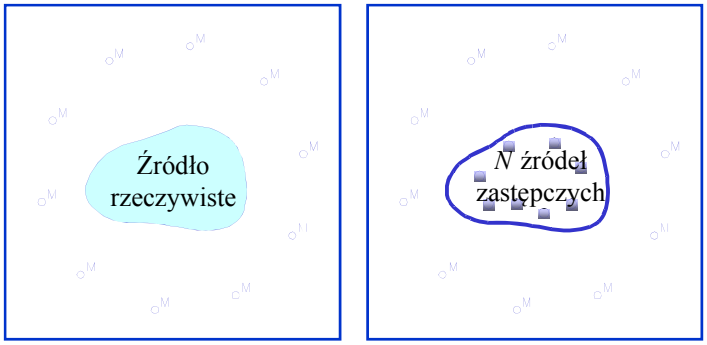


Rys. 5.1. Podział metod wykorzystywanych w badaniach procesów wibroakustycznych [21]

W badaniach złożonych układów rzeczywistych (konstrukcji takich jak budowle, maszyny itp.) podstawowe znaczenie ma znajomość wartości energii wibroakustycznej magazynowanej, rozpraszanej i przenoszonej przez poszczególne elementy tych konstrukcji. Znajomość tych wartości służy do oceny wytężenia materiału, zmęczenia, badań diagnostycznych oraz predykcji hałasów, a także ułatwia projektowanie elementów układu (np. wibroizolacji). Każdy rzeczywisty układ fizyczny można podzielić na proste elementy, które są ze sobą połączone w różny sposób, a każdy z tych sposobów charakteryzuje się innymi właściwościami przenoszenia energii wibroakustycznej. Tworzy się równania bilansu energetycznego, wprowadzając współczynniki strat energii, a także charakterystyki wejściowe (wymuszenie zewnętrzne). Jednocześnie coraz częściej stosuje się metody inwersji, zarówno do identyfikacji źródeł energii wibroakustycznej jak i modelowania akustycznego maszyn (patrz podrozdział 5.2).

5.2. Metoda inwersji w modelowaniu akustycznym maszyn

Modelując proces promieniowania energii wibroakustycznej przez źródło do odbiorcy oraz znając rzeczywistą wartość ciśnienia akustycznego w punktach pomiarowych, można odwrócić model drogi propagacji i w ten sposób wyznaczyć parametry źródła dźwięku. Na rys. 5.2 przedstawiono schemat wyznaczania parametrów modeli metodą inwersji [18, 21-23].



Rys. 5.2. Schemat wyznaczania parametrów modeli metodą inwersji [18, 21-23]

Ciśnienie akustyczne w punktach obserwacji oznaczonych na rys. 5.2 jako M można wyznaczyć, posługując się metodą inwersji [18, 21-23] opisaną zależnością (5.1):

$$\boldsymbol{\pi} = \mathbf{G}\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{e} \tag{5.1}$$

gdzie:

$\boldsymbol{\pi}$ – wektor m-wymiarowy zmierzonych zespolonych amplitud ciśnienia akustycznego w punktach obserwacji

$\boldsymbol{\alpha}$ – wektor n-wymiarowy zespolonych wartości parametrów źródeł modelu

$\mathbf{G}$ – macierz $m \times n$ określająca zespoloną wartość ciśnienia akustycznego w punktach obserwacji za pomocą parametrów źródeł zastępczych, wyznaczona na podstawie właściwości przyjętego modelu emisji

$\boldsymbol{e}$ – m-wymiarowy wektor błędu.

Aby zminimalizować wektor błędu, $\boldsymbol{e}$, należy dopasować parametry poszczególnych źródeł zastępczych modelu. W takim przypadku powszechnie stosowanym kryterium oceny dopasowania jest metoda najmniejszej sumy kwadratów. W tej metodzie dąży się do minimalizacji funkcjonału opisanego wyrażeniem (5.2):

$$K = \boldsymbol{e}^T\boldsymbol{e} \tag{5.2}$$

Jednocześnie funkcjonał K można zapisać także w postaci równania (5.3):

$$K = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m}\left|\boldsymbol{\pi}_i - p_i\right|^2 \tag{5.3}$$

gdzie:

$N = \sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{\pi}_i^2$ – czynnik normujący (czynnik ten można pominąć, gdyż służy jedynie do porównywania kryteriów, a nie wpływa na wyznaczone parametry modelu)

p_i – zespolona amplituda ciśnienia akustycznego wyznaczonego za pomocą modelu emisji w punkcie i.

Zatem optymalne parametry źródeł zastępczych modelu można wyznaczyć wspomnianą metodą sumy kwadratów z zależności (5.4):

$$\boldsymbol{A} = (\mathbf{G}^T\mathbf{G})^{-1}\mathbf{G}^T\boldsymbol{\pi} \tag{5.4}$$

gdzie:

$\boldsymbol{A}$ – wektor n-wymiarowy estymowanych zespolonych wartości parametrów źródeł modelu.

Jeśli stosuje się metody inwersji, to niezbędne jest korzystanie z narzędzi analitycznych – w tym przypadku podstawowym narzędziem analitycznym jest rozkład macierzy względem wartości szczególnych SVD (ang. *singular value decomposition*) [21]. Przydatność tego rozkładu wynika z faktu, że macierz funkcji transferu, **G**, może być wyrażona w następującej postaci (5.5) [21]:

$$\mathbf{G} = \mathbf{U}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{V}^T \tag{5.5}$$

gdzie:

U,V – macierze ortonormalne

Σ – macierz diagonalna $m \times n$, w której poszczególne elementy z przekątnej spełniają warunek $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \ldots \geq \sigma_{\min(m,n)} \geq 0$.

Jeśli v_i oraz u_i są i-tymi kolumnami macierzy **U** i **V**, to zachodzą następujące związki:

$$\mathbf{G}v_i = \sigma_i u_i \quad \text{oraz} \quad \mathbf{G}^T u_i = \sigma_i v_i. \tag{5.6}$$

Wówczas macierzą pseudoinwersji nazywa się macierz daną zależnością (5.7):

$$\mathbf{G}^+ = (\mathbf{G}^T\mathbf{G})^{-1}\mathbf{G}^T \tag{5.7}$$

Dlatego wektor estymowanych zespolonych wartości parametrów źródeł modelu można wyznaczyć z zależności (5.8):

$$\boldsymbol{A} = \mathbf{G}^+\boldsymbol{\pi} \tag{5.8}$$

Macierz $\mathbf{G}^+$ zaś wyznacza się, korzystając z rozkładu SVD:

$$\mathbf{G}^+ = \mathbf{V}\boldsymbol{\Sigma}^+\mathbf{U}^T \tag{5.9}$$

gdzie:

$\boldsymbol{\Sigma}^+ = \left[S^{-1} | 0 \right]$

$S^{-1} = \text{diag}\,(1/\sigma_1 ... 1/\sigma_N)$.

Miarą dokładności wykonanych symulacji jest wartość wyrażenia (5.10):

$$\kappa(\mathbf{G}) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \tag{5.10}$$

Za pomocą tej wartości można oszacować błąd δa przy wyznaczaniu parametrów modelu zastępującego:

$$\left|\frac{\delta a}{a}\right| \le \kappa(\mathbf{G})\left|\frac{\delta p}{p}\right| \tag{5.11}$$

Przedstawione założenia i podstawy metod inwersji zostały wykorzystane do wyznaczania parametrów akustycznych modeli zastępczych maszyn.

W pracach własnych nad metodą modelowania [106, 107, 111-113] przyjęto, że badaną maszynę zastępuje się zespołem źródeł wszechkierunkowych, których lokalizacje pokrywają się z elementami funkcjonalnymi maszyny. Do obliczenia parametrów tych źródeł niezbędna jest znajomość rzeczywistych rozkładów ciśnienia akustycznego wokół modelowanej maszyny w wybranych punktach. W związku z tym parametrami wejściowymi modeli są wyniki pomiarów ciśnienia akustycznego wokół modelowanej maszyny. W tym celu niezbędne jest wyznaczenie zarówno rozkładu amplitudy ciśnień akustycznych jak

i rozkładu kątów przesunięć fazowych pomiędzy sygnałami akustycznymi. Kolejny etap postępowania jest związany z określeniem optymalnych parametrów akustycznych zastępczych źródeł wszechkierunkowych.

Elementy macierzy **G** (funkcje Greena) dla źródeł wszechkierunkowych można wyrazić w postaci zależności (5.12) [21]:

$$\mathbf{G}_{ij} = \frac{\exp\left(-ikr_{ij}\right)}{r_{ij}} \tag{5.12}$$

gdzie:

r_{ij} – odległość pomiędzy źródłem i oraz punktem obserwacji, w m

k – liczba falowa.

Korzystając z zależności (5.8), w wyniku zastosowania symulacji komputerowych uzyskuje się optymalne parametry (moce akustyczne) poszczególnych źródeł wszechkierunkowych odpowiadających poszczególnym elementom modelowanej maszyny.

Oprócz podstawowych parametrów, których wartości uzyskuje się w wyniku procesu modelowania akustycznego (lokalizacje, moce akustyczne i kąty przesunięcia fazowego źródeł zastępczych), parametrem wyjściowym modelu są również rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego wokół maszyny. Poziom ciśnienia akustycznego w punkcie znajdującym się w pobliżu modelowanej maszyny, o współrzędnych (θ, φ), jest wyznaczany z zależności (5.13) [25-28, 106, 107, 111, 113]:

$$L_p\left(\theta,\varphi\right) = 10\log 10\left(\sum_{i=1}^{n} A_i R_i\left(\theta,\varphi\right)\frac{\exp\left(-ikr_i + \psi_i\right)}{r_i}\right), \text{dB} \tag{5.13}$$

gdzie:

A_i – moment i-tego źródła zastępczego, w Pa · m

$R_i\left(\theta,\varphi\right) = \exp\left[ik\left(x_i\cos\varphi\sin\theta + y_i\sin\varphi\sin\theta + z_i\cos\theta\right)\right]$ – charakterystyka kierunkowa promieniowania i-tego źródła

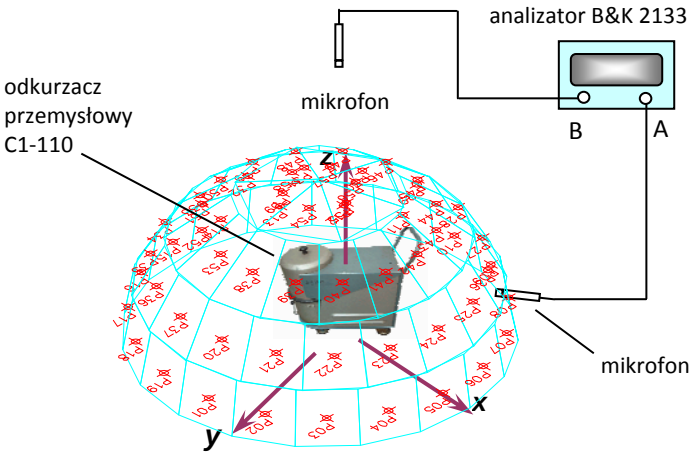
x_i, y_i, z_i – współrzędne położenia i-tego źródła, w m

ψ_i – kąt przesunięcia fazowego i-tego źródła, w rad.

5.3. Badania weryfikacyjne metody modelowania akustycznego wykorzystującego metodę inwersji

W celu weryfikacji opracowanej metody modelowania akustycznego maszyn i urządzeń z wykorzystaniem metody inwersji przeprowadzono liczne eksperymenty, których wyniki zostały opublikowane między innymi w pracach [25-28, 106, 107, 111, 113]. Dalej opisano wyniki jednego z przeprowadzonych eksperymentów weryfikacyjnych modelowania akustycznego z wykorzystaniem metody inwersji na przykładzie odkurzacza przemysłowego typu C1-110 o mocy 22 kW. Wybrano to urządzenie, ponieważ – pomimo jego niewielkich wymiarów – można było w nim wyróżnić cztery elementy: bok prawy, bok lewy, turbinę oraz układ ssania, które zastąpiono źródłami zastępczymi.

Jak już podano w podrozdziale 5.2, znajomość rzeczywistych rozkładów ciśnienia akustycznego wokół przemysłowych źródeł hałasu jest niezbędna m.in. do obliczeń parametrów modeli akustycznych. Aby poznać rozkład ciśnienia akustycznego, trzeba wyznaczyć na powierzchni półsfery rozkład amplitudy ciśnień akustycznych oraz rozkład kątów przesunięć fazowych pomiędzy sygnałami akustycznymi. W tym celu zestawiono w komorze bezechowej układ pomiarowy, którego schemat przedstawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Schemat układu pomiarowego i rozmieszczenie punktów pomiarowych wokół odkurzacza przemysłowego

Ciśnienie akustyczne mierzono za pomocą mikrofonu podłączonego do kanału A dwukanałowego analizatora B&K 2133. Mikrofon był umieszczany kolejno w 59 punktach pomiarowych (P01 ÷ P59) równomiernie rozmieszczonych na powierzchni półsfery, której środek pokrywał się ze środkiem geometrycznym odkurzacza. Do kanału B analizatora podłączono drugi mikrofon i dzięki jednoczesnym pomiarom sygnałów z obu mikrofonów można było wyznaczyć kąty przesunięć fazowych pomiędzy ciśnieniami akustycznymi panującymi na danym kierunku (mierzonymi za pomocą mikrofonu podłączonego do kanału A) i na kierunku odniesienia (mierzonym za pomocą nieruchomego, umieszczonego pionowo nad odkurzaczem, mikrofonu podłączonego do kanału B).

Amplitudę ciśnienia akustycznego p odczytywano z funkcji gęstości widmowej własnej sygnału z mikrofonu podłączonego do kanału A:

$$p^2 = G_{22} \tag{5.14}$$

gdzie:

$G_{22} = \int_{f-\frac{1}{2}\Delta f}^{f+\frac{1}{2}\Delta f} G_{22}(f)\,df$, w $\mathrm{N^2/m^4}$

$G_{22}(f)$ – funkcja gęstości widmowej własnej

f – badana częstotliwość, w Hz

Δf – szerokość pasma częstotliwości, w Hz.

Do określenia wielkości kątów przesunięć fazowych pomiędzy sygnałami wykorzystano funkcję wzajemnej gęstości widmowej między sygnałami z mikrofonów podłączonych do kanałów A i B. Kąt przesunięcia fazowego, ψ, wyznaczono ze stosunku części urojonej do rzeczywistej tej funkcji:

$$\psi = \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(G_{12})}{\mathrm{Re}(G_{12})}\right) \tag{5.15}$$

gdzie:

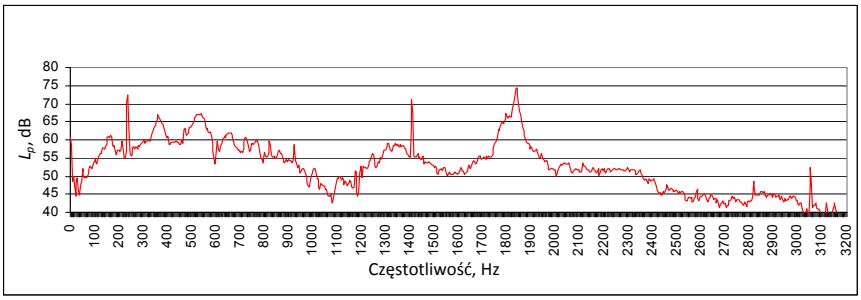
$$G_{12} = \int_{f-\frac{1}{2}\Delta f}^{f+\frac{1}{2}\Delta f} G_{12}(f)\,df$$

$G_{12}(f)$ – funkcja wzajemnej gęstości widmowej.

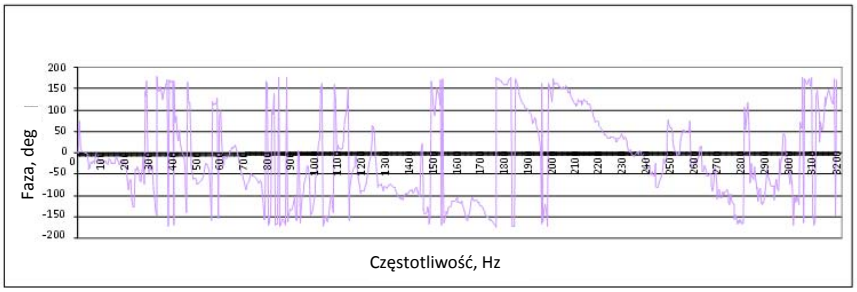
Pomiary wykonywano w 801 pasmach częstotliwościowych o szerokości 4 Hz w zakresie częstotliwości od 100 Hz do 3200 Hz. Przykładowe wyniki

pomiarów amplitudy ciśnienia akustycznego i kąta przesunięcia fazowego w punkcie pomiarowym P01 przedstawiono na rys. 5.4.

a)

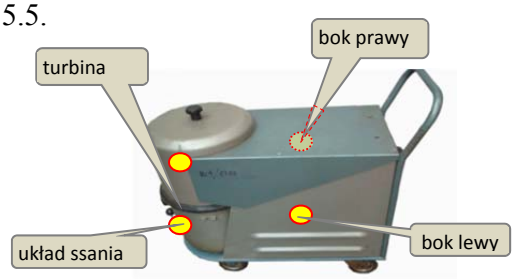


b)



Rys. 5.4. Przykładowy wynik pomiaru w punkcie P01: a) poziom ciśnienia akustycznego, b) kąt przesunięcia fazowego

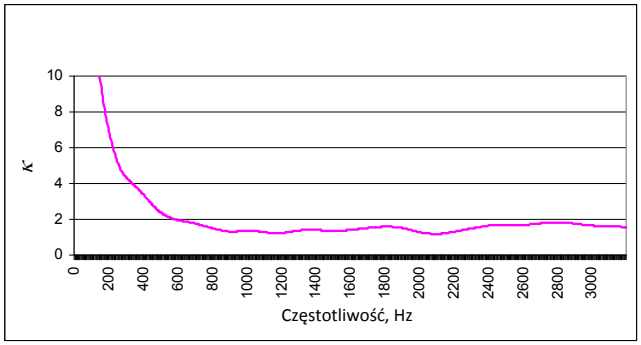
Zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.2 przyjęto lokalizacje wszechkierunkowych źródeł zastępczych pokrywające się z elementami funkcjonalnymi odkurzacza (turbina, układ ssania, bok lewy, bok prawy) rozmieszczonymi jak na rys. 5.5.



Rys. 5.5. Rozmieszczenie źródeł zastępczych w odkurzaczu przemysłowym

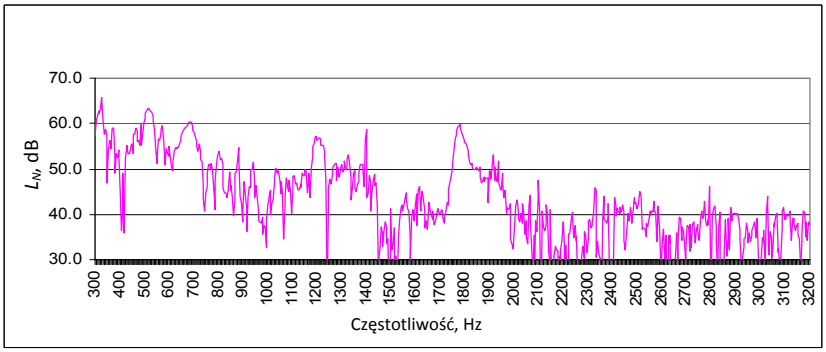
Dokładność obliczeń przeprowadzonych w procesie modelowania (wyznaczona ze wzoru 5.10 na podstawie wzajemnej konfiguracji źródeł zastęp-

czych i punktów obserwacji oraz na podstawie znajomości funkcji Greena dla źródeł zastępczych – wzór 5.12) przedstawiono na rys. 5.6.

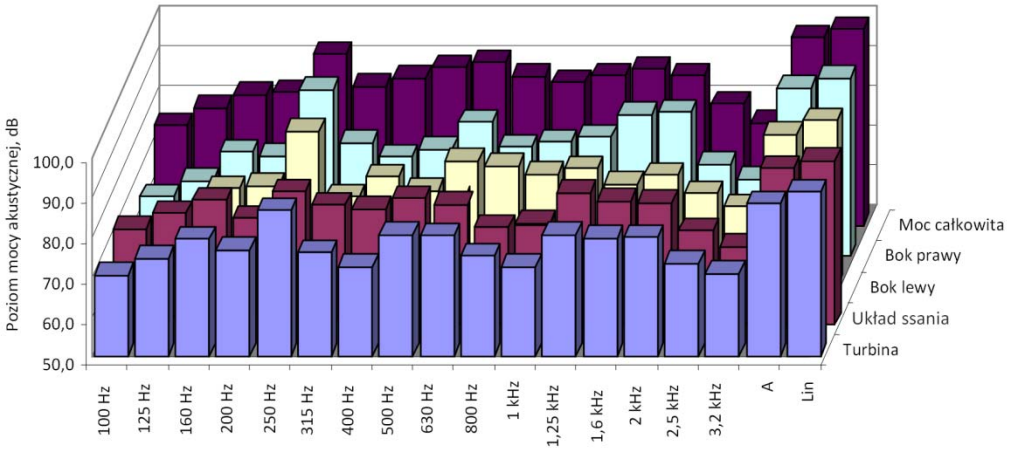


Rys. 5.6. Dokładność obliczeń, κ, w procesie modelowania odkurzacza przemysłowego

W wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych wyznaczono optymalne parametry (moce akustyczne) poszczególnych źródeł wszechkierunkowych odpowiadających poszczególnym elementom odkurzacza (przykładowe widmo poziomu mocy akustycznej źródła zastępczego „turbina" przedstawiono na rys. 5.7). Sumaryczna moc akustyczna źródeł zastępczych może być większa od rzeczywistej mocy akustycznej odkurzacza, ponieważ poszczególne elementy maszyny są ze sobą powiązane kinematycznie (ich drgania są z sobą zsynchronizowane) i pomiędzy źródłami występuje oddziaływanie wzajemne. W związku z tym całkowitą moc akustyczną określono, uwzględniając moce wzajemne pomiędzy poszczególnymi źródłami. Wyniki tych obliczeń (poziom mocy całkowitej) przedstawiono na rys. 5.8.



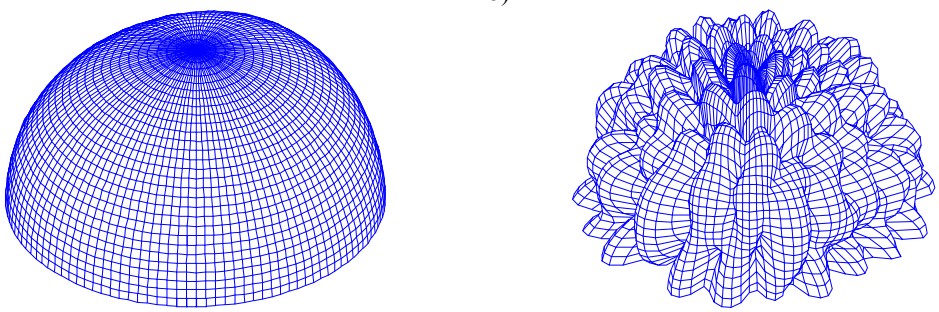
Rys. 5.7. Poziom mocy akustycznej, L_N, źródła zastępczego „turbina"



Rys. 5.8. Poziomy mocy akustycznej źródeł zastępczych (turbiny, układu ssania, boku prawego oraz boku lewego) i całkowity poziom mocy akustycznej odkurzacza przemysłowego z uwzględnieniem mocy wzajemnych

Korzystając z zależności (5.13), na podstawie wyznaczonych parametrów zastępczych źródeł dźwięku, wyznaczono rozkłady poziomów ciśnienia akustycznego wokół odkurzacza. Charakterystyki kierunkowe promieniowania dla niskich częstotliwości były gładkie, a wraz ze wzrostem częstotliwości stawały się coraz bardziej nieregularne i postrzępione, czyli w zakresie niskich częstotliwości odkurzacz można traktować jak źródło wszechkierunkowe, a ze wzrostem częstotliwości zaobserwować można kierunkowość promieniowania energii akustycznej. Przykładowe charakterystyki kierunkowe promieniowania przedstawiono na rys. 5.9.

a) b)



Rys. 5.9. Charakterystyki promieniowania odkurzacza przemysłowego: a) dla częstotliwości 140 Hz, b) dla częstotliwości 3200 Hz

Kolejnym etapem badań było określenie wpływu lokalizacji źródeł zastępczych na poziom emitowanego hałasu. W tym celu przeprowadzono symulacje komputerowe dotyczące zmian lokalizacji czterech źródeł zastępczych badanego odkurzacza. Przykładowy wpływ zmiany odległości między dwoma źródłami zastępczymi „bok prawy" i „bok lewy" na wartość poziomu ciśnienia akustycznego na stanowisku operatora odkurzacza przedstawiono w tab. 5.1.

Tabela 5.1. Poziomy ciśnienia akustycznego na stanowisku operatora odkurzacza przemysłowego w zależności od odległości między źródłami zastępczymi „bok lewy" i „bok prawy" – wyniki modelowania

Częstotliwość, Hz	**Poziom ciśnienia akustycznego, w dB, w zależności od odległości między źródłami zastępczymi „bok lewy" i „bok prawy":**					
	0,1 m	**0,2 m**	**0,3 m**	**0,4 m**	**0,5 m**	**0,6 m**
100	61,6	61,6	61,5	61,5	61,4	61,3
125	67,0	66,8	66,7	66,5	66,3	66,0
160	71,5	71,4	71,2	71,0	70,6	70,2
200	67,8	67,6	67,3	66,9	66,3	65,6
250	74,0	73,8	73,4	72,9	72,2	71,3
315	69,9	70,1	70,2	70,2	70,2	70,0
400	73,6	73,9	74,1	74,0	73,8	73,5
500	75,2	75,4	75,8	76,1	76,5	76,9
630	76,1	77,8	78,6	78,6	77,7	76,1
800	76,6	77,8	77,8	77,3	76,9	77,3
1000	72,4	70,9	71,9	74,2	75,3	75,0
1250	73,2	74,8	77,4	77,7	76,1	75,1
1600	71,2	68,7	70,6	72,8	75,5	75,8
2000	72,5	69,2	73,1	73,0	75,0	75,6
2500	67,5	68,6	67,1	67,5	68,2	68,2
3200	64,9	68,7	68,4	65,6	66,2	69,5
A	82,7	83,2	84,3	84,5	84,7	84,7

Pierwotnie, zgodnie z rzeczywistą konstrukcją odkurzacza, odległość między źródłami zastępczymi wynosiła 0,5 m. Dla tego przypadku poziom dźwięku A na stanowisku operatora wynosił 84,7 dB (tab. 5.1). Z tab. 5.1 wynika, że zmniejszenie tej odległości powodowało obniżenie poziomu dźwięku A do wartości 82,7 dB (dla odległości między źródłami zastępczymi wynoszącej 0,1 m).

Najistotniejszym elementem badań weryfikujących modelowanie akustyczne z wykorzystaniem metody inwersji było porównanie wartości poziomów mocy akustycznej badanych maszyn (urządzeń) i wartości poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowiskach pracy badanych maszyn (urządzeń) wyznaczonych na podstawie przeprowadzonego modelowania z wartościami zmierzonymi znormalizowanymi metodami ujętymi w normach ([169] – poziom mocy akustycznej, [182] – poziom ciśnienia akustycznego emisji). Porównanie tych wartości wykazało ich dużą zbieżność – różnice nie przekraczały 3 dB. Na przykład w przypadku omawianego odkurzacza przemysłowego wyznaczone poziomy mocy akustycznej A wynosiły 97,3 dB – na podstawie modelowania i 97,1 dB – metodą znormalizowaną, a poziomy ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku operatora: 84,7 dB – metodą modelowania i 82 dB – metodą znormalizowaną.

Zatem można przyjąć, że wartości parametrów akustycznych maszyn uzyskane na podstawie modelu zastępczego (otrzymanego z zastosowaniem metody inwersji) są zgodne z wartościami uzyskanymi znormalizowanymi metodami pomiarowymi. Przyjmowane lokalizacje wszechkierunkowych źródeł zastępczych (tj. lokalizacje odpowiadające elementom funkcjonalnym modelowanych maszyn) oraz wyznaczane optymalne parametry tych źródeł z dużą dokładnością (w szczególności w zakresie częstotliwości powyżej 400 Hz) odzwierciedlają rzeczywiste maszyny i urządzenia.

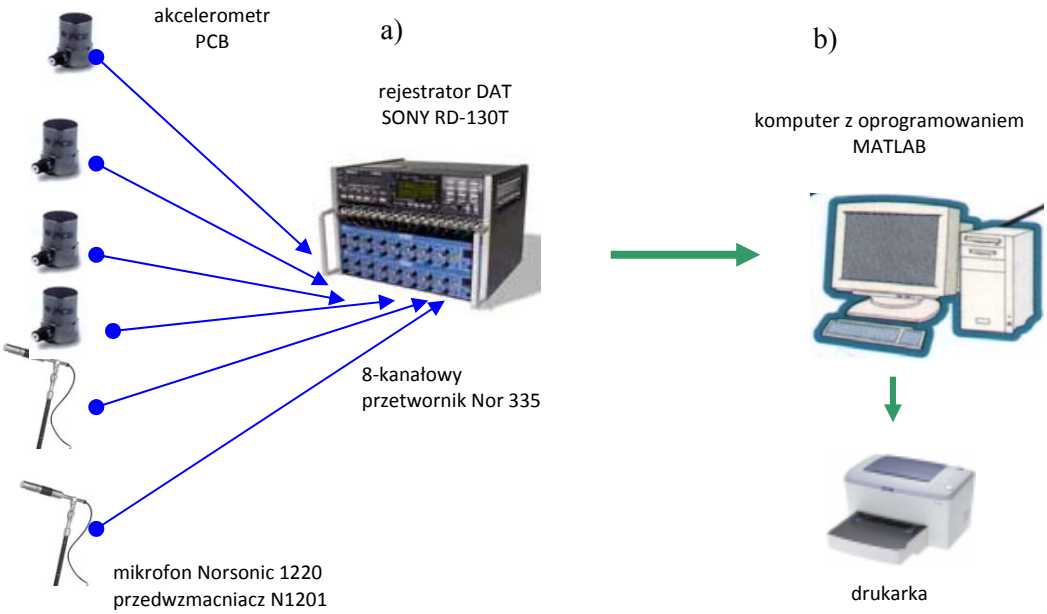
Wartości parametrów akustycznych źródeł zastępczych uzyskiwane w wyniku procedury modelowania umożliwiają określenie wpływu lokalizacji tych źródeł na poziom hałasu emitowanego przez maszynę. Ma to szczególne znaczenie podczas procesu projektowania maszyn i urządzeń, i stanowi istotny element fazy projektowania określonej jako projekt szczegółowy (scharakteryzowanej w podrozdziale 3.3). W przypadku omawianego odkurzacza przemysłowego zmniejszenie odległości między źródłami zastępczymi „bok lewy” i „bok prawy” o 0,4 m prowadzi do obniżenia poziomu ciśnienia akustycznego na stanowisku operatora odkurzacza o 2 dB (tab. 5.1).

5.4. Wskaźniki promieniowania i przeniesienia energii młota kuźniczego

Badania eksperymentalne dotyczące wyznaczania omówionych w podrozdziale 4.3 wskaźników promieniowania i przeniesienia energii przeprowadzono dla wielu źródeł hałasu [112, 113]. Jednym z tych źródeł był młot kuźniczy, którego wybór wiązał się z następującymi jego cechami:

– duża, stacjonarna maszyna
– przykład źródła hałasu zarówno impulsowego, jak i stacjonarnego w czasie.

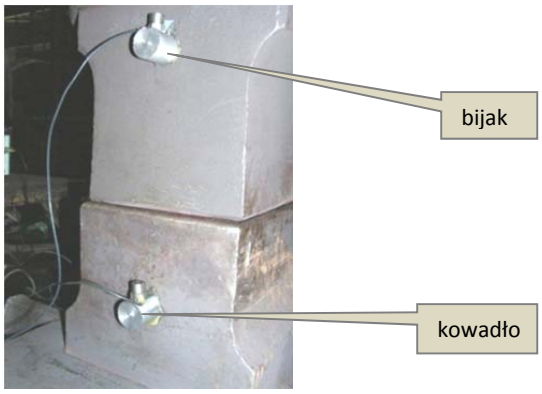
Jak już nadmieniono w podrozdziale 4.3, wyznaczenie wskaźników promieniowania energii akustycznej i przeniesienia energii maszyny wymaga zmierzenia poziomów ciśnienia akustycznego i poziomów przyspieszenia drgań lub poziomów prędkości drgań powierzchni elementów maszyn. W celu wyznaczenia tych parametrów zestawiono tor pomiarowy przedstawiony na rys. 5.10a, który umożliwiał jednoczesny pomiar ciśnienia akustycznego i przyspieszenia drgań powierzchni na wybranych elementach maszyn.



Rys. 5.10. Tor pomiarowy (a) i tor analizujący (b) do wyznaczenia parametrów wibroakustycznych maszyn

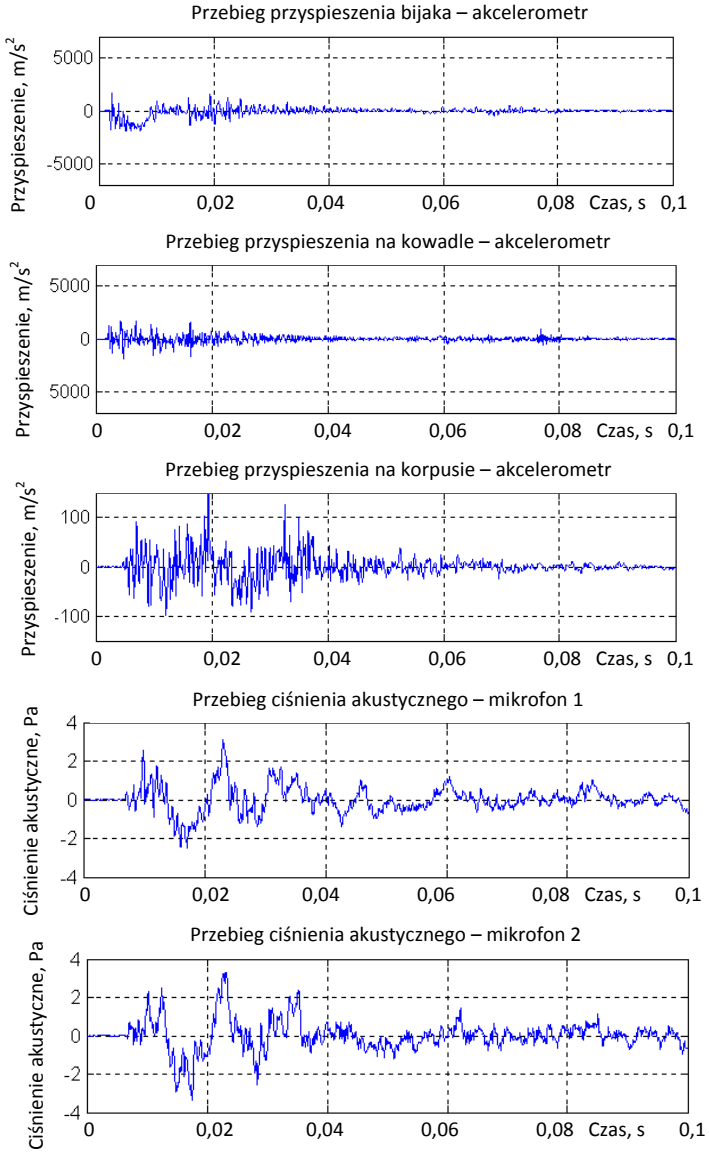
Rozmieszczenie mikrofonów oraz akcelerometrów podczas badań parametrów wibroakustycznych młota kuźniczego Massey 1000 pokazano na rys. 5.11 i 5.12.

Rys. 5.11. Rozmieszczenie mikrofonów podczas badań młota kuźniczego Massey 1000



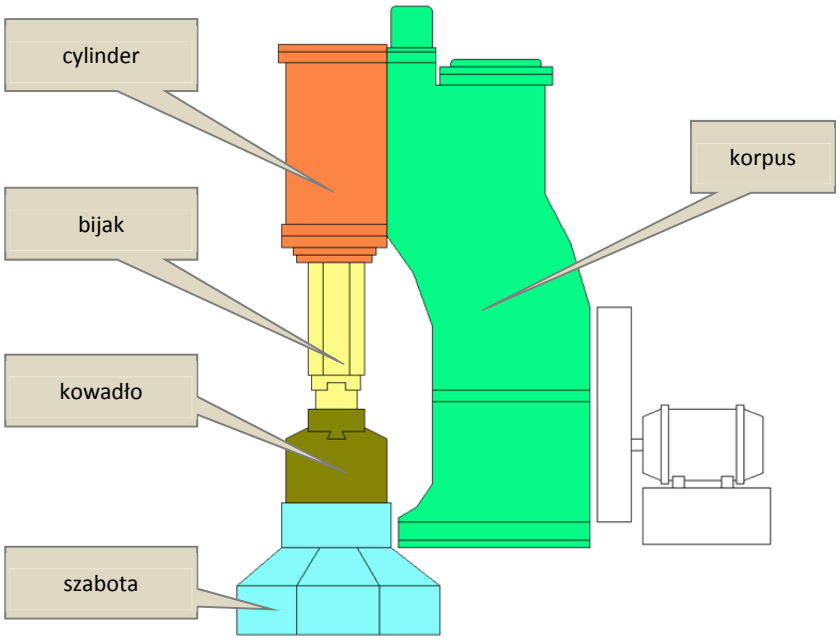
Rys. 5.12. Rozmieszczenie akcelerometrów na bijaku i kowadle młota kuźniczego Massey 1000

Przykładowe przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowanych przez akcelerometry oraz przebiegi czasowe sygnałów z mikrofonów w trakcie uderzeń młota przedstawiono na rys. 5.13.



Rys. 5.13. Przebiegi czasowe sygnałów zarejestrowane podczas uderzenia bijaka

Aby wyznaczyć schemat przepływu energii wibroakustycznej podczas pracy badanego młota, podzielono go umownie na pięć podzespołów: korpus, cylinder, bijak, kowadło oraz szabota (rys. 5.14).

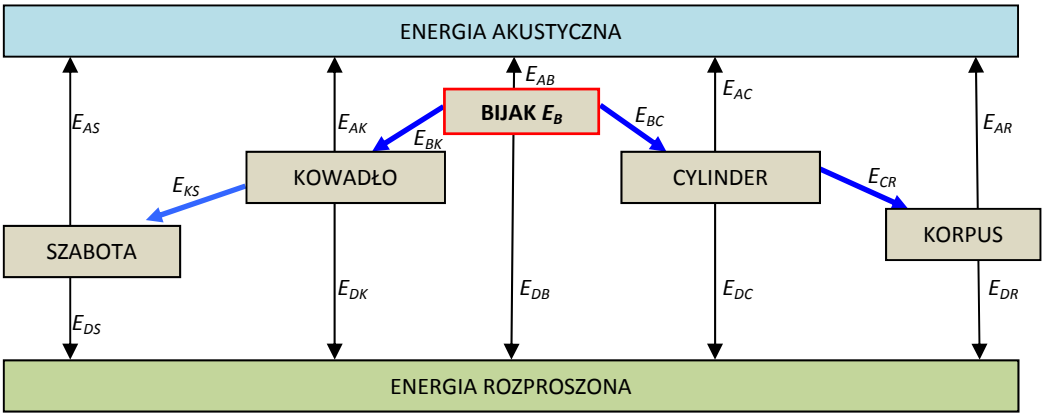


Rys. 5.14. Schemat podziału młota na podzespoły

Wyznaczony schemat przepływu energii wibroakustycznej dla tak podzielonego młota przedstawiono na rys. 5.15. Źródłem energii uderzenia młota jest bijak. Energia uderzenia przenosi się z jednej strony na kowadło i dalej na szabotę, a następnie rozprasza się, a z drugiej strony poprzez cylinder przenosi się na korpus. W każdym z elementów młota następuje rozpraszanie energii oraz promieniowanie energii akustycznej.

Zatem równania bilansu energii rozpatrywanego młota kuźniczego można przedstawić za pomocą następującego układu równań (5.16):

$$\begin{cases} E_B = E_{BK} + E_{BC} + E_{AB} + E_{DB} \\ E_{BK} = E_{KS} + E_{AK} + E_{DK} \\ E_{KS} = E_{AS} + E_{DS} \\ E_{BC} = E_{CR} + E_{AC} + E_{DC} \\ E_{CR} = E_{AR} + E_{DR} \end{cases} \tag{5.16}$$



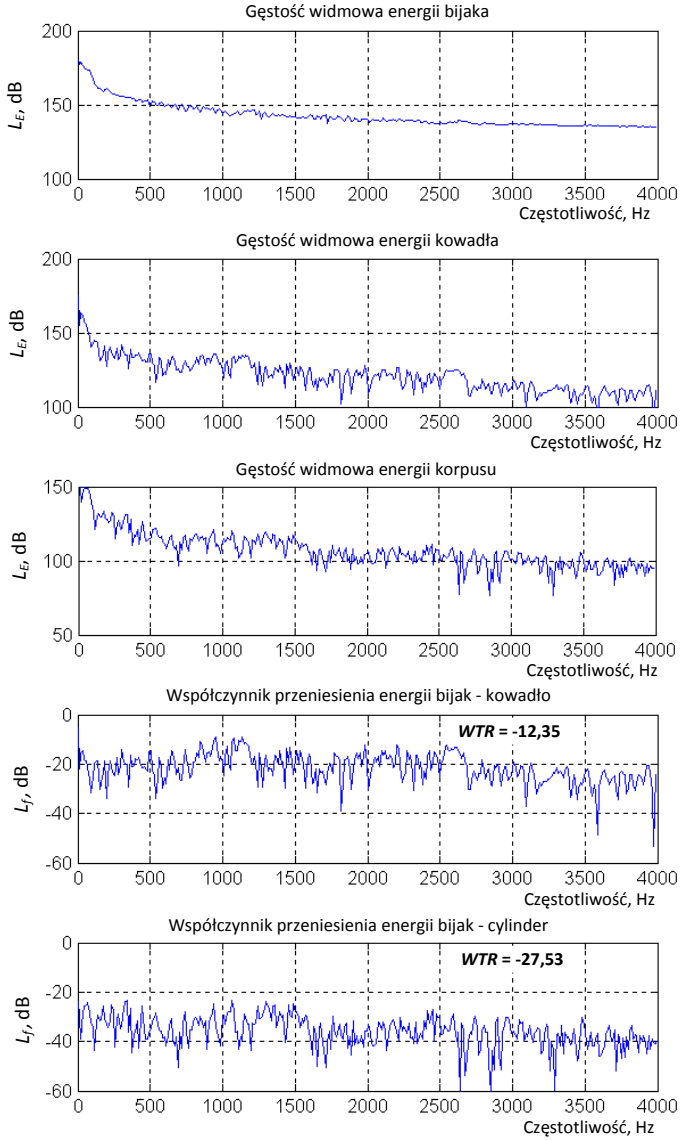
E_B – energia kinetyczna dostarczana przez bijak
E_{BK} – energia przekazana z bijaka na kowadło
E_{BC} – energia przekazana z bijaka na cylinder
E_{AB} – energia akustyczna wypromieniowana przez bijak
E_{DB} – energia rozproszona przez bijak
E_{AK} – energia akustyczna wypromieniowana przez kowadło
E_{DK} – energia rozproszona przez kowadło
E_{KS} – energia przekazana z kowadła do szaboty
E_{AS} – energia akustyczna wypromieniowana przez szabotę
E_{DS} – energia rozproszona przez szabotę
E_{AC} – energia akustyczna wypromieniowana przez cylinder
E_{DC} – energia rozproszona przez cylinder
E_{CR} – energia przekazana z cylindra do korpusu
E_{AR} – energia akustyczna wypromieniowana przez korpus
E_{DR} – energia rozproszona przez korpus

Rys. 5.15. Schemat przepływu energii wibroakustycznej podczas pracy młota

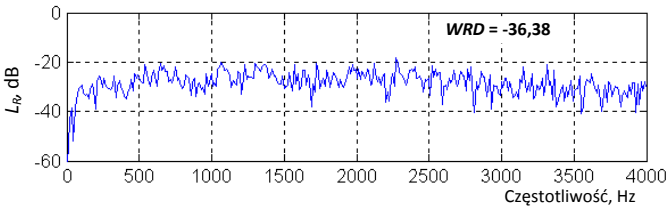
Określono gęstości widmowe energii wibroakustycznej elementów młota oraz współczynniki promieniowania energii jako funkcję częstotliwości, jak również wartości wskaźników przeniesienia energii *WTR*. Na rys. 5.16 przedstawiono gęstości widmowe energii bijaka, kowadła oraz korpusu. Ponieważ źródłem energii uderzenia młota jest bijak, więc wytwarza on największą porcję energii wibroakustycznej ze wszystkich elementów młota. Natomiast z porównania energii wibroakustycznej kowadła i korpusu wynika, że pierwszy z tych elementów charakteryzuje się większą energią wibroakustyczną. Znajduje to odzwierciedlenie w wartościach wskaźników przeniesienia energii, *WTR*, które wynoszą: –12,35 dla układu bijak-kowadło oraz –26,10 dla układu bijak-cylinder. A zatem głównym elementem młota odbierającym energię wibroakustyczną bijaka jest kowadło. Przenoszone jest do niego ponad 10 razy więcej energii wibroakustycznej niż do cylindra.

Wyznaczony przebieg zależności współczynnika promieniowania energii (L_R) przez kowadło od częstotliwości przedstawiono na rys. 5.17. Określono

także wskaźnik promieniowania energii *WRD* kowadła, który wynosił –36,38. Wartość ta wskazuje, że kowadło cechuje się małą sprawnością promieniowania energii akustycznej, w konsekwencji czego większa część jego energii wibroakustycznej jest przenoszona do szaboty i rozpraszana niż wypromieniowana.



Rys. 5.16. Gęstości widmowe energii elementów młota kuźniczego oraz wskaźniki przeniesienia energii *WTR*



Rys. 5.17. Współczynnik promieniowania energii przez kowadło oraz wskaźnik promieniowania energii *WRD*

6

Miara jakości akustycznej maszyny

6.1. Wprowadzenie

Zastosowanie w praktyce opracowanego przez autora pojęcia jakości akustycznej maszyny jak również osiągnięcie wysokiego poziomu tej jakości wymaga między innymi postępowania zgodnego z opisanymi w podrozdziale 3.3 dobrymi praktykami akustycznymi w procesie projektowania maszyn o ograniczonym hałasie.

Ograniczenie emisji hałasu maszyn należy do zadań priorytetowych, a jednocześnie jest jednym z najbardziej skutecznych środków zmniejszania ryzyka wynikającego z narażenia na hałas. Wymaganie zmniejszenia ryzyka narażenia na hałas dotyczy zarówno operatorów maszyn, jak innych osób będących w pobliżu maszyn. Zatem maszyna powinna być zaprojektowana i wykonana w taki sposób, aby zagrożenia wynikające z emisji hałasu były zredukowane do najniższego poziomu, z uwzględnieniem aktualnego poziomu technicznego i dostępności środków ograniczających poziom hałasu, w szczególności u źródła jego powstawania. W tym celu należy postępować na etapie projektowania zgodnie z zaproponowanymi przez autora zasadami ekoprojektowania maszyn o ograniczonym hałasie. Osiągnięciu wysokiej jakości akustycznej maszyny służą także takie działania, jak przeprowadzone starannie badania akustyczne i ocena akustyczna maszyny.

Istotnym elementem determinującym praktyczną przydatność jakości akustycznej maszyny jest możliwość jej liczbowego ujęcia, czyli wprowadzenie miary jakości akustycznej.

W załączniku 1. scharakteryzowano zawartość przygotowywanej przez producenta deklaracji nt. hałasu emitowanego przez maszynę. Deklaracja może zawierać wartości trzech wielkości charakteryzujących emisję hałasu: poziomu

ciśnienia akustycznego emisji skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A na stanowisku pracy (jeśli przekracza 70 dB), szczytowego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową C na stanowisku pracy (jeśli przekracza 130 dB) oraz skorygowanego poziomu mocy akustycznej A (jeśli wartość poziomu ciśnienia akustycznego emisji skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A na stanowisku pracy przekracza 80 dB). Deklaracja ta ma dwa zasadnicze cele dla użytkownika maszyny: ułatwia wybór maszyny charakteryzującej się ograniczonym hałasem oraz dostarcza informacje niezbędne do przeprowadzenia oceny narażenia na hałas wg zasad ujętych w dyrektywie 2003/10/WE [149] (opisanych w załączniku 1.).

Zatem deklaracja emisji hałasu dostarczona przez producenta maszyny podaje jedynie informacje na temat udziału hałasu maszyny w łącznym hałasie na stanowiskach pracy i nie może stanowić miary jej jakości akustycznej. Na podstawie tej informacji nie można w prosty sposób określić narażenia pracownika na hałas w warunkach eksploatacyjnych, ponieważ narażenie to, jak już wcześniej wykazano, zależy od parametrów charakteryzujących warunki eksploatacyjne, między innymi od takich czynników, jak lokalizacja maszyny w pomieszczeniu eksploatacyjnym, właściwości akustyczne tego pomieszczenia, odległość stanowiska pracy od maszyny czy też poziomy hałasu emitowanego przez inne maszyny funkcjonujące w tym pomieszczeniu.

W celu rozwiązania tego problemu autor opracował:

- globalny wskaźnik jakości akustycznej maszyny, za pomocą którego można zmierzyć jakość akustyczną maszyny (zdefiniowany dalej)
- metodę prognozowania hałasu w warunkach eksploatacyjnych maszyn na podstawie wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny
- narzędzie informatyczne (oprogramowanie) wspomagające prawidłowe rozmieszczenie maszyn pod kątem minimalizacji szkodliwego oddziaływania hałasu na pracowników, na podstawie wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny.

Powyższa metoda oraz oprogramowanie zostały opisane w rozdziale 7.

6.2. Globalny wskaźnik jakości akustycznej maszyny

Jako miarę jakości akustycznej maszyny przyjęto globalny wskaźnik jej jakości akustycznej uwzględniający związki między poziomem hałasu na stanowisku pracy maszyny a wybranymi parametrami charakteryzującymi nie tylko aktywność akustyczną maszyny, lecz także pomieszczenie eksploatacyjne.

W celu opracowania tego wskaźnika podjęto próbę opisu emisji hałasu maszyny za pomocą wskaźników cząstkowych. Przyjęto założenie, że globalny wskaźnik jakości akustycznej maszyny, określony na podstawie wartości wskaźników cząstkowych, w sposób przybliżony umożliwi nie tylko ocenę akustyczną maszyny, lecz również prognozowanie hałasu w pomieszczeniach eksploatacyjnych oraz optymalizację lokalizacji maszyn i stanowisk pracy w tych pomieszczeniach pod kątem minimalizacji narażenia na hałas. Przyjęto, że globalny wskaźnik jakości akustycznej maszyny, Q_{GWA}, określa się z zależności (6.1):

$$Q_{GWA} = \prod_{i=1}^{n} Q_i \tag{6.1}$$

gdzie:

Q_i – cząstkowe wskaźniki jakości

n – liczba cząstkowych wskaźników jakości.

Założono, że wartość każdego ze wskaźników cząstkowych Q_i jest zawsze wielkością dodatnią, niemianowaną. Ponadto przyjęto, że wartość dowolnego ze wskaźników większa od 1 oznacza, że dany parametr niekorzystnie wpływa na klimat akustyczny w środowisku pracy, co wskazuje na konieczność podjęcia stosownych działań celem zmniejszenia wartości tego wskaźnika. Natomiast wartość mniejsza lub równa 1 oznacza, że dany parametr pozytywnie wpływa na warunki akustyczne – klimat akustyczny na stanowisku pracy.

Jeżeli wartość globalnego wskaźnika Q_{GWA} jest mniejsza lub równa 1, maszynę można uważać za bezpieczną akustycznie, to znaczy, że poziom ciśnienia akustycznego na stanowisku pracy nie przekracza wartości dopuszczalnej. Natomiast jeżeli jest ona większa od 1, to hałas emitowany przez maszynę przekracza wartość dopuszczalną skorygowanego poziomu dźwięku A na stanowisku pracy. Zainstalowanie takiej maszyny w hali przemysłowej może być uciążliwe także dla innych pracowników, którzy nie są bezpośrednio związani z jej obsługą.

Zasadniczo wskaźniki cząstkowe Q_i można podzielić na zależne tylko od danej maszyny, zależne od właściwości akustycznych pomieszczenia oraz mieszane, zależne zarówno od maszyny jak i pomieszczenia. W związku z tym wskaźnik umożliwiający ocenę akustyczną maszyny, tj. globalny wskaźnik jakości akustycznej maszyny, wyznacza się z zależności (6.2):

$$Q_{GWA} = Q_N \cdot Q_R \cdot Q_\Theta \cdot Q_{\text{imp}} \cdot Q_F \tag{6.2}$$

gdzie:

Q_N – wskaźnik mocy akustycznej

Q_R – wskaźnik odległości stanowiska pracy od maszyny

Q_Θ – wskaźnik kierunkowości promieniowania

Q_{imp} – wskaźnik hałasu impulsowego i uderzeniowego

Q_F – wskaźnik rozkładu widma hałasu.

6.3. Wskaźniki cząstkowe

6.3.1. Wskaźnik mocy akustycznej

Podstawowym parametrem obiektywnie charakteryzującym emisję hałasu maszyny jest poziom mocy akustycznej. Parametr ten jest uwzględniany poprzez cząstkowy wskaźnik mocy akustycznej. Zwiększenie wartości poziomu mocy akustycznej w sposób naturalny powinno powodować wzrost wartości wskaźnika mocy akustycznej. Zatem Q_N został zdefiniowany zależnościami (6.3) i (6.4):

$$Q_N = 1 + \frac{L_{WA} - L_0}{50} \quad \text{dla} \quad L_{WA} \geq L_0 \tag{6.3}$$

$$Q_N = \frac{1}{1 - \dfrac{L_{WA} - L_0}{50}} \quad \text{dla} \quad L_{WA} < L_0 \tag{6.4}$$

gdzie:

L_0 – wartość dopuszczalna skorygowanego poziomu mocy akustycznej A maszyny, w dB (jeśli nie ma wartości dopuszczalnej poziomu mocy

akustycznej, to zaleca się przyjmować $L_0 = 90$ dB)

L_{WA} – skorygowany poziom mocy akustycznej A maszyny, w dB.

6.3.2. Wskaźnik odległości stanowiska pracy od maszyny

Zgodnie z zasadami propagacji fal akustycznych poziom ciśnienia akustycznego maleje wraz ze zwiększaniem odległości od źródła dźwięku. Zatem im dalej od maszyny znajduje się stanowisko pracy, w tym mniejszym stopniu pracownik jest narażony na hałas generowany przez obsługiwaną przez niego maszynę. Sytuację taką można opisać za pomocą wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny, Q_R:

$$Q_R = \frac{3,7}{3,2 + \log\left(\Omega r^2\right)} \tag{6.5}$$

gdzie:

r – odległość stanowiska pracy od maszyny, w m

Ω – kąt bryłowy promieniowania, w rad.

Dla odległości stanowiska pracy od maszyny r większej niż 5 m zaleca się przyjmowanie wartości $Q_R = 1$.

6.3.3. Wskaźnik kierunkowości promieniowania

Kolejny wskaźnik cząstkowy jest funkcją różnicy między średnią wartością poziomu dźwięku A wokół maszyny w odległości równej odległości stanowiska pracy od maszyny a wartością poziomu dźwięku A na stanowisku pracy. Wskaźnik opisują zależności (6.6) i (6.7):

$$Q_\Theta = 1 + \frac{L_{pA} - L_{pA\text{śr}}}{50}, \text{ gdy } L_{pA} \geq L_{pA\text{śr}} \tag{6.6}$$

oraz

$$Q_\Theta = \frac{1}{1 - \frac{L_{pA} - L_{pA\text{śr}}}{50}}, \text{ gdy } L_{pA} < L_{pA\text{śr}} \tag{6.7}$$

gdzie:

$L_{pA\text{śr}}$ – uśredniona wartość poziomu dźwięku A wokół maszyny w odległości równej odległości stanowiska pracy od maszyny, w dB

L_{pA} – wartość poziomu dźwięku A na stanowisku pracy, w dB.

6.3.4. Wskaźnik hałasu impulsowego i uderzeniowego

Wiele maszyn przemysłowych generuje hałas o charakterze impulsowym – często występującym hałasem, szczególnie w przemyśle ciężkim, jest hałas uderzeniowy, np. uderzenia metal o metal (prasy, młoty itp.). Parametrami hałasu impulsowego są: wartości szczytowe poziomu ciśnienia akustycznego, czas trwania impulsu, czas narastania impulsu, widmo impulsu, liczba impulsów i czas ich powtarzania.

Wykorzystując zasady oceny hałasu maszyn i urządzeń ujęte w pracy [90], wskaźnik hałasu impulsowego i uderzeniowego, Q_{imp}, można wyznaczyć na podstawie wartości szczytowego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową C, $L_{C\text{peak}}$. Wartości wskaźnika przedstawiono w tab. 6.1.

Tabela 6.1. Wartość wskaźnika hałasu impulsowego i uderzeniowego

Wartość szczytowa poziomu ciśnienia akustycznego skorygowana charakterystyką częstotliwościową C, $L_{C\text{peak}}$, dB	**Liczba impulsów w czasie 8 godzin pracy**	**Wskaźnik hałasu impulsowego i uderzeniowego, Q_{imp}**
$135 < L_{C\text{peak}}$	bez ograniczeń	1,1
$125 < L_{C\text{peak}} \leq 135$	$n \leq 100$	1,08
$115 < L_{C\text{peak}} \leq 125$	$n \leq 1000$	1,06
$105 < L_{C\text{peak}} \leq 115$	$n \leq 10\,000$	1,04
$95 < L_{C\text{peak}} \leq 105$	$n \leq 100\,000$	1,02
$L_{C\text{peak}} \leq 95$	bez ograniczeń	1,0

6.3.5. Wskaźnik rozkładu widma

Ocenę widma akustycznego można przeprowadzić, stosując odpowiednią krzywą oceny hałasu N [21, 32]. Z kształtu krzywych oceny hałasu N wynika, że większe znaczenie przypisywane jest częstotliwościom wyższym niż niższym, co uzasadnia się znacznie większą uciążliwością i szkodliwością hałasów o wysokich częstotliwościach. Jednakże w przypadku ogólnej, wielopunktowej oceny, prowadzonej w hali przemysłowej, byłaby to metoda niezwykle uciąż-

liwa. W takim przypadku zasadne jest wprowadzenie metody opisanej w pracy [78], z możliwością jej adaptacji do celów oceny hałasu występującego w halach przemysłowych. Założeniem metody jest określenie różnicy między zmierzonymi poziomami dźwięku z zastosowaniem filtrów korekcyjnych A i C, a następnie przypisanie wartości różnicy odpowiedniej klasy widma hałasu w zakresie od I do VI.

Wyznaczony tą metodą wskaźnik rozkładu widma, Q_F, przyjmuje wartości podane w tab. 6.2.

Tabela 6.2. Wartości wskaźnika rozkładu widma Q_F

Klasa hałasu	$\Delta L_{C\text{-}A} = L_C - L_A$, dB	Wskaźnik rozkładu widma, Q_F
I	≤ 0	1,00
II	0,1 – 2,0	1,05
III	2,1 – 4,0	1,10
IV	4,1 – 9,0	1,15
V	9,1 – 15,0	1,20
VI	> 15,0	1,25

6.4. Metody wyznaczania wskaźników cząstkowych jakości akustycznej maszyn

6.4.1. Wyznaczanie wskaźnika mocy akustycznej

Znajomość wartości poziomu mocy akustycznej maszyny jest niezbędna do obliczenia wskaźnika mocy akustycznej, Q_N. Dla celów prac inżynierskо-technicznych wykorzystuje się serie norm europejskich, zharmonizowanych z dyrektywą maszynową [150] i zaimplementowanych do zbioru polskich norm, dotyczących określenia poziomu mocy akustycznej albo na podstawie pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego albo metodami natężeniowymi (patrz załącznik 1.). W przypadku metod wymagających pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego określenie wartości wskaźnika mocy akustycznej, Q_N, wymaga zrealizowania pomiarów ciśnienia akustycznego w polu akustycznym wokół maszyny oraz przeprowadzenia obliczeń prowa-

dzących do wyznaczenia poziomu mocy akustycznej. Klasyfikacja metod określania poziomu mocy akustycznej na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego, podana w załączniku 1. (tab. Z-4), wynika z wymagań dotyczących:

- źródła hałasu
- środowiska pomiarowego
- dokładności poszczególnych metod.

Dotychczasowe doświadczenia autora dotyczące ocen akustycznych umożliwiają stwierdzenie, że w przypadku metod znormalizowanych wystarczające jest określenie poziomu mocy akustycznej metodą o klasie dokładności orientacyjnej lub ewentualnie o klasie dokładności technicznej. Metody te są stosowane w warunkach pola swobodnego nad powierzchnią odbijającą dźwięk (zdefiniowanych, odpowiednio, w dokumentach [171] i [169]).

Alternatywą dla znormalizowanych metod wyznaczania poziomu mocy akustycznej jest zastosowanie metody inwersji opisanej w rozdziale 5. Stosując inwersyjne techniki pomiarowe, wielokrotnie badano parametry pola akustycznego w pomieszczeniach przemysłowych. Uzyskane wyniki wykorzystywano m.in. do modelowania źródeł hałasu, określania lokalizacji źródeł dźwięku i wyznaczania ich mocy akustycznych, wyznaczania wskaźników oceny akustycznej maszyn i pomieszczeń [25-28, 104-107, 109, 110, 112-115]. W podrozdziale 6.5 przedstawiono zastosowanie metody inwersji do wyznaczania poziomu mocy akustycznej badanych źródeł hałasu.

6.4.2. Wyznaczanie wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny

Wyznaczanie wartości tego wskaźnika, oprócz określenia odległości stanowiska pracy od maszyny jako jednolitego źródła hałasu (np. prostopadłościanu ograniczającego maszynę), wymaga wyznaczenia wartości kąta bryłowego promieniowania, Ω. Wartości tego kąta dla różnych ustawień maszyny podano w tab. 6.3.

Tabela 6.3. Wartości kąta bryłowego promieniowania, Ω, w zależności od ustawienia maszyny w pomieszczeniu

Sposób ustawienia maszyny w pomieszczeniu	**Kąt bryłowy promieniowania, rad**
Na płaszczyźnie odbijającej dźwięk w „polu swobodnym”	2π
Na płaszczyźnie odbijającej dźwięk w pobliżu drugiej płaszczyzny odbijającej (np. przy ścianie)	π
Na płaszczyźnie odbijającej dźwięk w pobliżu dwóch innych płaszczyzn odbijających (np. w rogu pomieszczenia)	$\frac{1}{2}\pi$

6.4.3. Wyznaczenie wskaźnika kierunkowości promieniowania

Wskaźnik kierunkowości promieniowania jest określany na podstawie różnicy poziomów dźwięku A: poziomu dźwięku A wyznaczonego na stanowisku pracy, L_{pA}, i średniej wartości poziomu dźwięku A, $L_{pA\text{śr}}$, wokół maszyny w odległości równej odległości stanowiska pracy od maszyny.

Analogicznie do przypadku poziomu mocy akustycznej, poziom dźwięku A na stanowiskach pracy, L_{pA}, można obliczyć na podstawie parametrów zastępczego modelu akustycznego badanej maszyny, korzystając z zależności (5.13). Alternatywnie można zastosować jedną ze znormalizowanych metod wyznaczania poziomu ciśnienia akustycznego emisji na stanowiskach pracy (patrz załącznik 1.). W tym drugim przypadku zaleca się najpowszechniej stosowane metody o klasie dokładności orientacyjnej (określonej w normie [183]) lub technicznej (zdefiniowanej w normach [182] i [184]).

W wymienionej serii norm zdefiniowane są również metody określania szczytowego poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową C na stanowisku pracy, którego wartość jest niezbędna do obliczenia wartości wskaźnika hałasu impulsowego i uderzeniowego, Q_{imp}, oraz wskaźnika rozkładu widma, Q_F.

6.5. Badania doświadczalne generatorów prądotwórczych

W celu zweryfikowania globalnego wskaźnika jakości akustycznej przeprowadzono wiele badań doświadczalnych [104, 105, 114, 116]. Jedną z grup badanych źródeł hałasu był zestaw generatorów prądotwórczych różnej mocy (rys. 6.1):

- CMI C-G800 800 W – silnik dwusuwowy, moc 800 W, producent Euromate GmbH, Niemcy
- CMI C-G2000 2,0 kW – silnik czterosuwowy, moc 2 kW, producent Euromate GmbH, Niemcy
- CMI C-G3500 3,5 kW – silnik czterosuwowy, moc 3,5 kW, producent Euromate GmbH, Niemcy
- NT250Up 2,6 kW – silnik czterosuwowy, moc 2,6 kW, producent Nutool Group of Companies UK, Wielka Brytania.

Wszystkie te generatory były zasilane spalinowymi silnikami benzynowymi, chłodzonymi powietrzem, wytwarzającymi prąd o znormalizowanym napięciu 230 V i częstotliwości 50 Hz.

Rys. 6.1. Benzynowe generatory prądotwórcze przygotowane do badań akustycznych

Wybór tych źródeł do badań wynikał między innymi z charakteru emitowanego hałasu (hałas ustalony) i możliwości łatwej zmiany obciążenia przez podłączenie do spirali grzejnej. W trakcie pracy każdy z generatorów prądotwórczych (umieszczonych na betonowej podłodze na środku pomieszczenia przemysłowego) obciążono oporową spiralą grzejną typu 0R48 o regulowanej mocy grzewczej 350 W, 700 W i 1500 W (rys. 6.2).

Rys. 6.2. Generator prądotwórczy i odbiornik prądu (spirala grzejna Termika)

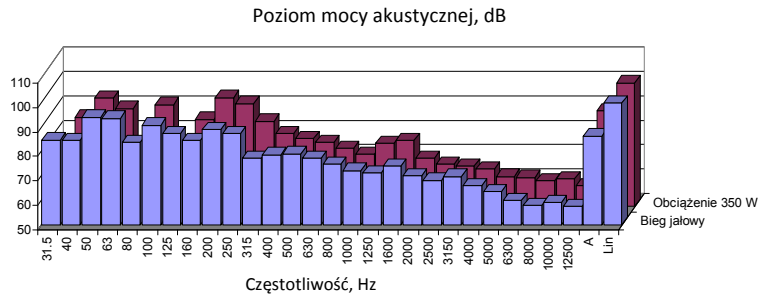
Badania składały się z trzech następujących etapów:

- wyznaczania globalnych wskaźników jakości akustycznej badanych urządzeń
- pomiarów poziomu dźwięku A na stanowiskach pracy badanych urządzeń
- sprawdzania, czy w sytuacji, gdy wskaźnik Q_{GWA} jest większy od 1 ($Q_{GWA} > 1$), wartość poziomu dźwięku A na stanowiskach pracy przekracza 85 dB.

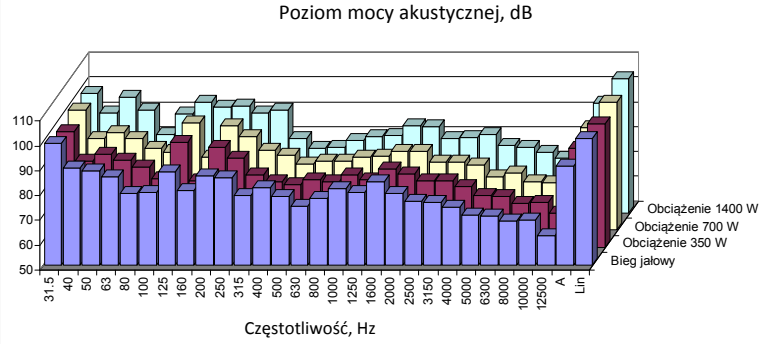
Do wyznaczenia wskaźnika mocy akustycznej maszyny zastosowano metodę inwersji. W tym celu ciśnienie akustyczne było mierzone za pomocą 12 mikrofonów typu 40PQ, firmy GRAS, umieszczonych na statywach wokół badanych generatorów. Wyniki pomiarów gromadzono z wykorzystaniem oprogramowania LabVIEW 8.20, w którym utworzono wirtualne przyrządy umożliwiające jednoczesną rejestrację sygnału z 12 mikrofonów, a następnie jednoczesny zapis amplitudy i fazy sygnału pomiarowego w plikach. Do wyznaczenia pozostałych wskaźników cząstkowych wykorzystano miernik poziomu dźwięku SVAN 945, przyrząd o klasie dokładności umożliwiającej rejestrację wszystkich parametrów hałasu wymaganych do oceny akustycznej stanowiska pracy. Do celów badawczych i po to, by porównać uzyskane wyniki, jako stanowisko pracy przyjęto umownie punkt pomiarowy nad generatorem, w odległości 1,0 m od korpusu.

Jak już wcześniej wspomniano, poziomy mocy akustycznej badanych generatorów wyznaczono metodą inwersji. Przyjęto, że każdy generator był modelowany za pomocą jednego, wszechkierunkowego źródła zastępczego. Na

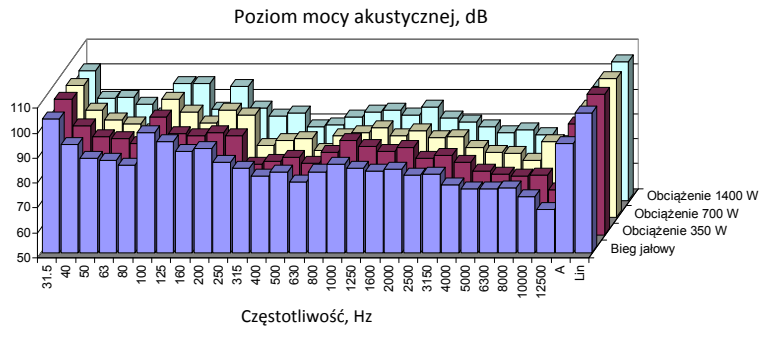
rys. 6.3-6.6 przedstawiono widma poziomów mocy akustycznej badanych generatorów prądotwórczych. Przykładowe widma hałasu generatora prądotwórczego NT250Up pokazano na rys. 6.7.



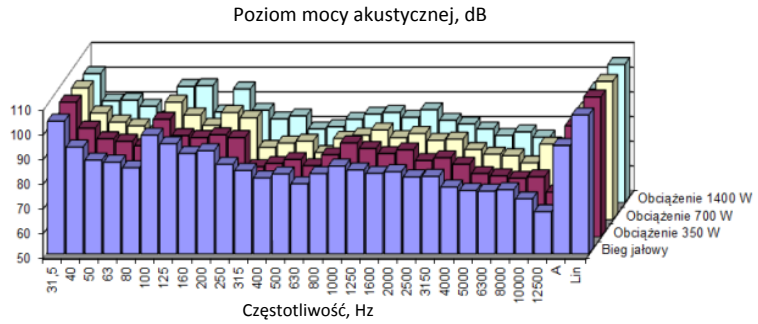
Rys. 6.3. Poziom mocy akustycznej generatora CMI C-G800; 800 W



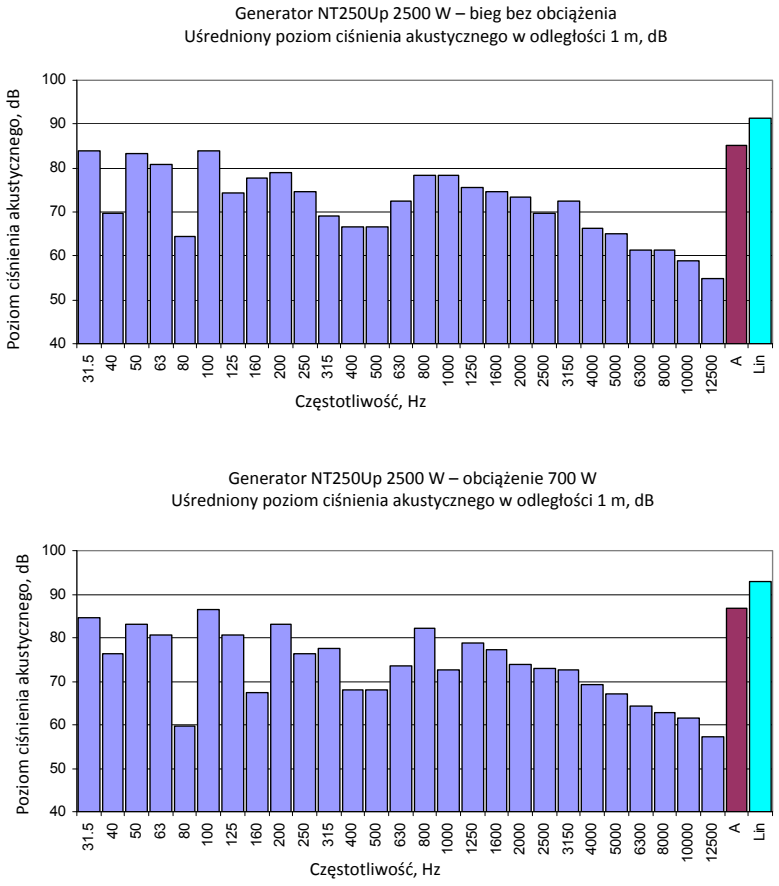
Rys. 6.4. Poziom mocy akustycznej generatora CMI C-G2000; 2 kW



Rys. 6.5. Poziom mocy akustycznej generatora NT250Up; 2,6 kW



Rys. 6.6. Poziom mocy akustycznej generatora CMI C-G3500; 3,5 kW



Rys. 6.7. Widma hałasu dla wybranych trybów pracy generatora prądotwórczego NT250Up

Wyniki pomiarów umożliwiły określenie (z wykorzystaniem zależności 6.3 – 6.7 oraz zasad ujętych w tab. 6.1 i 6.2) wartości cząstkowych wskaźników jakości – wskaźnika mocy akustycznej, Q_N, wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny, Q_R, wskaźnika kierunkowości promieniowania, Q_Θ, wskaźnika hałasu impulsowego i uderzeniowego, Q_{imp}, oraz wskaźnika rozkładu widma hałasu Q_F. Wartości tych wskaźników zawarto w tab. 6.4.

Tabela 6.4. Wartości cząstkowych wskaźników jakości generatorów prądotwórczych

Typ generatora	Tryb pracy – obciążenie, W	Q_N	Q_R	Q_Θ	Q_{imp}	Q_F
CMI C-G800; 800 W	0	0,93		0,93		1,06
	350	0,98		0,93		1,06
CMI C-G2000; 2,0 kW	0	1,00		0,97		1,04
	350	1,00		0,98		1,04
	700	1,02		0,97		1,06
	1500	1,09		0,94		1,06
NT250Up; 2,6 kW	0	1,08	0,925	0,96	1	1,02
	350	1,10		0,95		1,02
	700	1,09		0,98		1,02
	1500	1,12		0,93		1,04
CMI C-G3500; 3,5 kW	0	1,08		0,98		1,02
	350	1,10		0,97		1,02
	700	1,09		0,96		1,06
	1500	1,12		0,97		1,04

Wykorzystując wartości wskaźników cząstkowych podane w tab. 6.4 oraz zależność (6.2), obliczono wartości globalnych wskaźników jakości akustycznej, Q_{GWA}, badanych generatorów (tab. 6.5).

Wyznaczone globalne wskaźniki jakości akustycznej badanych generatorów przyjmują wartości od 0,85 do 1,05. Gdy wartość wskaźnika jest większa od 1, wówczas poziom dźwięku A na stanowisku pracy urządzenia przekracza wartość dopuszczalną, tj. 85 dB. W celu sprawdzenia tej prawidłowości w punktach pomiarowych odpowiadających przyjętym stanowiskom pracy

zmierzono poziomy dźwięku A, których wartości podano w tab. 6.5. Wartości poziomu dźwięku A zmierzone na stanowiskach pracy potwierdziły poprawność oceny prowadzonej na podstawie globalnego wskaźnika jakości akustycznej. W sytuacjach, gdy wartości wskaźnika Q_{GWA} były mniejsze od 1, zmierzone poziomy dźwięku A wynosiły poniżej 85 dB. Natomiast, gdy wartości tego wskaźnika były większe od 1, zmierzone poziomy dźwięku A przekraczały 85 dB.

Tabela 6.5. Wartości globalnych wskaźników jakości akustycznej generatorów prądotwórczych

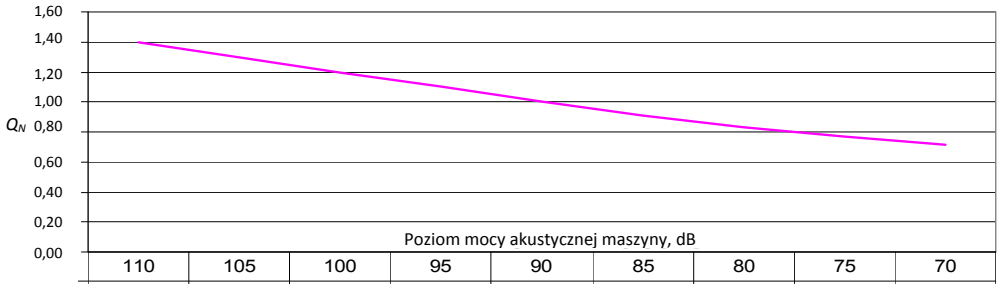
Typ generatora	**Tryb pracy – obciążenie, W**	**Globalny wskaźnik jakości akustycznej, Q_{GWA}**	**Zmierzony poziom dźwięku A na stanowisku pracy, dB**
CMI C-G800; 800 W	0	0,85	74,4
	350	0,89	77,5
CMI C-G2000; 2,0 kW	0	1,02	85,4
	350	1,03	85,6
	700	1,03	85,6
	1500	1,05	86,4
NT250Up; 2,6 kW	0	0,96	83,8
	350	0,96	84,2
	700	1,02	85,4
	1500	0,98	84,4
CMI C-G3500; 3,5 kW	0	0,93	80,2
	350	0,94	80,8
	700	0,97	83,3
	1500	1	85

6.6. Badania symulacyjne globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny

W celu określenia wpływu parametrów akustycznych maszyny oraz wybranych parametrów geometrycznych charakteryzujących warunki eksploatacyjne zarówno na wskaźniki cząstkowe jakości (wskaźnik mocy akustycz-

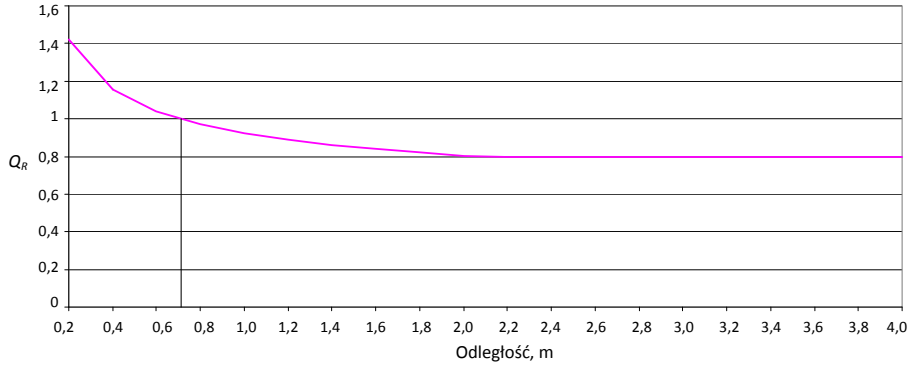
nej, Q_N, wskaźnik odległości stanowiska pracy od maszyny, Q_R, oraz kierunkowości promieniowania, Q_Θ) jak i na globalny wskaźnik jakości akustycznej, Q_{GWA}, przeprowadzono badania symulacyjne.

Wyniki badań symulacyjnych dotyczących zależności wskaźnika mocy akustycznej, Q_N, od poziomu mocy akustycznej maszyny przedstawiono na rys. 6.8. Zgodnie z wzorami (6.3) i (6.4) zmniejszanie poziomu mocy akustycznej maszyny implikuje zmniejszenie wartości wskaźnika mocy akustycznej, Q_N. Na przykład wartość wskaźnika Q_N zmniejsza się z 1,4 do 0,71, gdy poziom mocy akustycznej maszyny obniża się odpowiednio od wartości 110 dB do 70 dB.



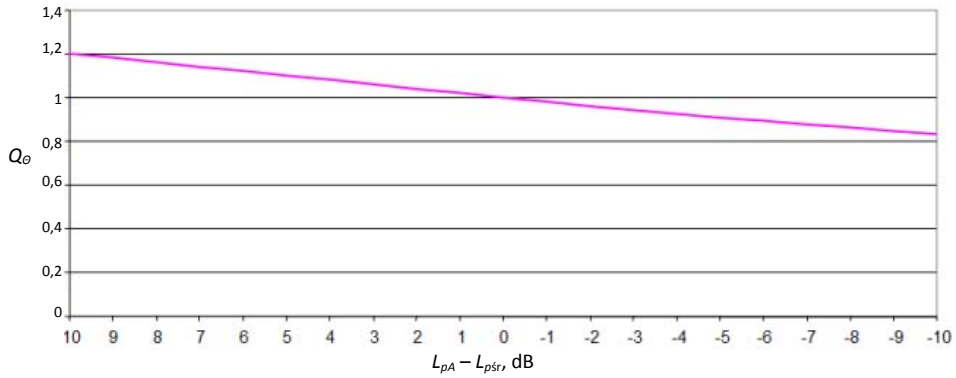
Rys. 6.8. Zależność wskaźnika mocy akustycznej, Q_N od mocy akustycznej maszyny

Na rys. 6.9 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wskaźnika Q_R jako funkcji odległości stanowiska pracy od maszyny. Zwiększanie tej odległości powoduje zmniejszanie wartości wskaźnika Q_R, przy czym dla odległości większych niż 2 m przyjmuje on stałą wartość $Q_R = 0{,}8$. Zaznaczona na rys. 6.9 odległość 0,71 m odpowiada wartości wskaźnika $Q_R = 1$, która z kolei odpowiada wartości poziomu ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy wynoszącemu 85 dB, pod warunkiem, że wartość iloczynu pozostałych wskaźników spełni warunek: $Q_N \cdot Q_{\text{imp}} \cdot Q_F \cdot Q_\Theta = 1$. Na przykład, jeśli się założy stałą wartość iloczynu $Q_N \cdot Q_{\text{imp}} \cdot Q_F \cdot Q_\Theta = 1$, to wartość wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny $Q_R = 1{,}2$ (co odpowiada odległości ok. 0,38 m) oznaczać będzie, że poziom dźwięku A na stanowisku pracy wyniesie 95 dB – przekroczenie wartości dopuszczalnej o 10 dB. Zmniejszenie tej odległości do 0,2 m spowoduje przekroczenie wartości dopuszczalnej poziomu dźwięku A na stanowisku pracy o 20 dB ($Q_R = 1{,}4$).



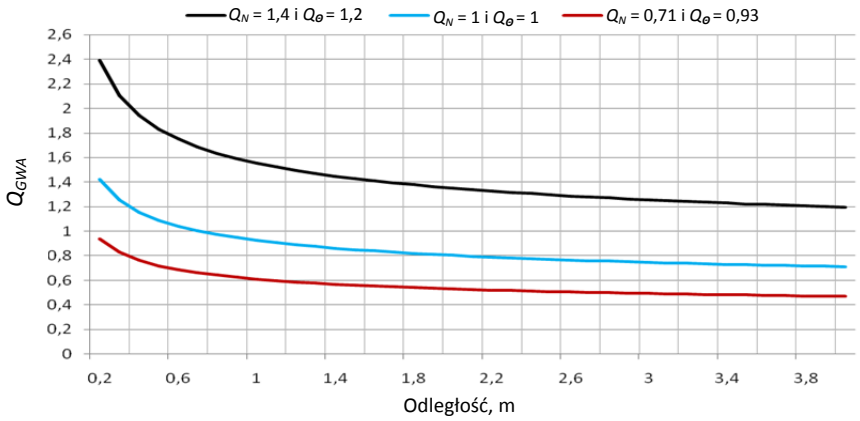
Rys. 6.9. Zależność wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny, Q_R, od odległości między maszyną a stanowiskiem pracy

Kolejny wskaźnik cząstkowy, tj. wskaźnik kierunkowości promieniowania, Q_Θ, dostarcza informacji o lokalizacji stanowiska pracy „korzystnej" lub „niekorzystnej" ze względu na charakterystykę kierunkowości promieniowania, która jest wyrażana różnicą między poziomem ciśnienia akustycznego zmierzonym na stanowiskach pracy a uśrednionym poziomem ciśnienia akustycznego wokół maszyny w tej samej odległości co stanowisko pracy. Zależność wartości wskaźnika Q_Θ od tej różnicy przedstawiono na rys. 6.10.

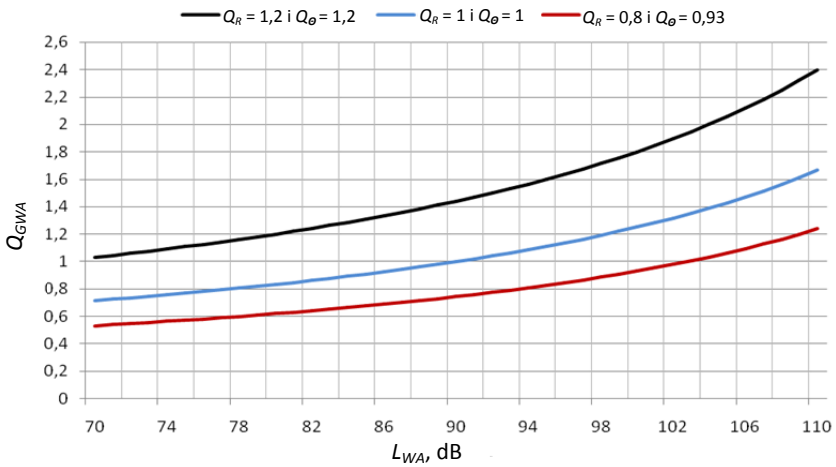


Rys. 6.10. Zależność wskaźnika kierunkowości promieniowania, Q_Θ, od różnicy między poziomem ciśnienia akustycznego zmierzonym na stanowisku pracy maszyny a średnim poziomem ciśnienia akustycznego wokół maszyny w tej samej odległości co stanowisko pracy

Przedstawione zależności dla wskaźników cząstkowych, Q_N i Q_R, znajdują odbicie w wartościach globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny, Q_{GWA}. Na rys. 6.11 przedstawiono wpływ odległości stanowiska pracy od maszyny na wartość globalnego wskaźnika, Q_{GWA}, dla wybranych kombinacji wartości wskaźników cząstkowych Q_N i Q_Θ. Można przyjąć, że zwiększenie tej odległości powyżej 4 m nie powoduje w zasadzie zmiany wartości wskaźnika Q_{GWA}. Natomiast wpływ wartości skorygowanego poziomu mocy akustycznej A na wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej Q_{GWA} dla różnych kombinacji wartości wskaźników cząstkowych Q_R i Q_Θ przedstawiono na rys. 6.12.



Rys. 6.11. Wpływ odległości między maszyną a stanowiskiem pracy na wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej Q_{GWA}



Rys. 6.12. Wpływ skorygowanego poziomu mocy akustycznej A, L_{WA}, maszyny na wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA}

Wyniki badań, zgodnie z oczekiwaniami, wykazały wzrost wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA} zarówno wraz ze zwiększaniem poziomu mocy akustycznej maszyny, jak i zmniejszaniem odległości między maszyną a stanowiskiem pracy.

7

Prognozowanie hałasu na podstawie globalnego wskaźnika jakości akustycznej

7.1. Wprowadzenie

Wprowadzając globalny wskaźnik jakości akustycznej maszyny, kierowano się jego wykorzystaniem nie tylko do oceny akustycznej maszyn, lecz również do prognozowania hałasu w pomieszczeniach eksploatacyjnych, a przede wszystkim wspomagania planowania prawidłowego rozmieszczenia maszyn w pomieszczeniu pod kątem minimalizacji narażenia na hałas. W tym celu opracowano narzędzie informatyczne – program realizujący wymienione funkcje na podstawie wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej za pomocą algorytmu genetycznego.

Ogólnie, algorytm genetyczny jest algorytmem przeszukującym przestrzeń alternatywnych rozwiązań zdefiniowanego problemu w celu wyszukania rozwiązań najlepszych [45, 46]. Sposób działania algorytmów genetycznych przypomina zjawisko ewolucji biologicznej – wykorzystują one mechanizmy doboru naturalnego i dziedziczenia, czyli stanowią metodę optymalizacji z zastosowaniem mechanizmów adaptacyjnych wzorowanych na systemach biologicznych [82]. Przez optymalizację rozumie się tutaj procedurę znajdowania rozwiązania określonego zadania dającego najlepsze rezultaty z punktu widzenia założonego celu. Poszukiwanie rozwiązania odbywa się poprzez przetwarzanie tego rozwiązania, jego ocena zaś jest tworzona na podstawie tzw. funkcji celu (nazywanej również funkcją przystosowania), która obrazuje, jak dobre – według przyjętych kryteriów – jest znalezione rozwiązanie. Elementarny algorytm genetyczny jest stosunkowo prosty i składa się z trzech powtarzanych cyklicznie operacji:

– reprodukcji
– krzyżowania
– mutacji.

W wyniku tych operacji z tzw. pokolenia rodzicielskiego jest tworzone pokolenie potomne, które podlega z kolei analogicznym procesom, stanowiąc bazę dla kolejnego pokolenia [82]. Dzięki zastosowaniu zdefiniowanego kryterium wyboru osobników biorących udział w reprodukcji, każde kolejne pokolenie zawiera osobniki coraz lepiej przystosowane do stawianego im zadania. Proces tworzenia nowych generacji osobników jest zatrzymywany w momencie, gdy zostanie spełnione kryterium świadczące o uzyskaniu osobnika lub osobników o cechach umożliwiających wykonanie zadania z założoną dokładnością.

W ostatnich latach algorytmy genetyczne są coraz częściej stosowane w obszarze działań związanych z ograniczeniem zagrożeń wibroakustycznych w środowisku pracy, w tym między innymi w układach aktywnej redukcji hałasu [82], do:

– modelowania i identyfikacji źródeł hałasu w układach aktywnej redukcji hałasu [126]
– znajdowania najkorzystniejszych położeń źródeł kompensujących i elementów pomiarowych, stanowiących elementy składowe systemu do aktywnej redukcji hałasu [83, 118]
– adaptacji parametrów kontrolera systemu aktywnej redukcji [137].

Ponadto algorytmy genetyczne są stosowane do identyfikacji źródeł hałasu w zakładach przemysłowych [74], minimalizacji zawodowej ekspozycji na hałas [85, 86], w tym optymalizacji wykorzystania środków technicznych do ograniczania hałasu i optymalizacji działań organizacyjnych w celu ograniczenia zawodowego narażenia na hałas (np. w zakresie rotacji pracowników i planowania przerw w pracy) [3, 4] czy też do projektowania wyrobów o ograniczonej emisji hałasu [5].

7.2. Program do prognozowania emisji hałasu maszyn i ich optymalnej lokalizacji w pomieszczeniach przemysłowych

7.2.1. Założenia ogólne

Z podanych w rozdziale 6. definicji wskaźników cząstkowych i globalnego wskaźnika jakości akustycznej wynika, że wskaźnik mocy akustycznej, Q_N, nie zależy od parametrów środowiska akustycznego (pomieszczenia), w którym znajduje się maszyna, natomiast wskaźniki hałasu impulsowego i uderzeniowego, Q_{imp}, oraz wskaźnik rozkładu widma, Q_F, zależą od tego środowiska w niewielkim stopniu. Wymienione trzy wskaźniki są powiązane przede wszystkim z samą maszyną (jej parametrami akustycznymi i technologią pracy). Zatem w oprogramowaniu do prognozowania emisji hałasu maszyn na podstawie globalnego wskaźnika jakości akustycznej przyjęto, że wskaźnik mocy akustycznej, wskaźnik hałasu impulsowego i uderzeniowego oraz wskaźnik rozkładu widma podczas symulacji i obliczeń za pomocą algorytmu genetycznego nie podlegają zmianie, a proces prognozowania i optymalizacji opiera się na minimalizacji wartości wskaźnika odległości od maszyny, Q_R, oraz wskaźnika kierunkowości promieniowania, Q_Θ. Takie podejście ma dostatecznie silne podstawy praktyczne, gdyż umożliwia wspomaganie prawidłowego rozmieszczenia maszyn poprzez zmianę parametrów geometrycznych środowiska pracy (lokalizacji oraz wzajemnego położenia maszyn i stanowisk pracy w obrębie pomieszczenia) bez ingerencji w konstrukcję samej maszyny.

Aby wyznaczyć wartość wskaźnika kierunkowości promieniowania, Q_Θ, należy określić poziom ciśnienia akustycznego na stanowisku pracy na podstawie parametrów akustycznych maszyny i pomieszczenia oraz parametrów geometrycznych pomieszczenia i współrzędnych geometrycznych maszyny i stanowiska pracy. Dokładność prognozowania rozkładu ciśnienia akustycznego wewnątrz pomieszczenia zależy od przyjętej metody obliczeń. Ze względu na czasochłonność obliczeń oraz fakt, że podczas działania algorytmu genetycznego w ramach jednego cyklu iteracji obliczenia muszą być powtarzane tyle razy, ile wynosi liczebność populacji, przyjęto, że rozkłady ciśnienia akustycznego będą wyznaczane z zastosowaniem metody statystycznej. Zgodnie

z tym podejściem związek między mocą akustyczną maszyny i ciśnieniem akustycznym w odległości r od maszyny ma postać wyrażoną zależnością (7.1):

$$L_{pA} = L_{WA} + 10\log\left(\frac{\Omega_{\Theta}}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_c}\right), \text{dB} \tag{7.1}$$

gdzie:

L_{pA} – poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową A, w dB

L_{WA} – poziom mocy akustycznej maszyny A, w dB

r – odległość od maszyny, w m

R_c – stała pomieszczenia, w m^2

Ω_{Θ} – współczynnik kierunkowości.

Stała pomieszczenia, R_c, jest określona zależnością (7.2):

$$R_c = \frac{S\alpha_{\text{śr}}}{1-\alpha_{\text{śr}}}, \text{m}^2 \tag{7.2}$$

gdzie:

$\alpha_{\text{śr}}$ – średni współczynnik pochłaniania pomieszczenia

S– całkowita powierzchnia pomieszczenia, w m^2.

Średni współczynnik pochłaniania jest określony równaniem (7.3):

$$\alpha_{\text{śr}} = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{N} S_i \cdot \alpha_i \tag{7.3}$$

gdzie:

α_i – współczynnik pochłaniania i-tej ściany

S_i – powierzchnia i-tej ściany, w m^2

N – liczba ścian pomieszczenia.

Opracowując oprogramowanie założono, że umożliwi ono:

– wyznaczanie rozkładów globalnego wskaźnika jakości akustycznej w wybranych przekrojach obszarów ograniczonych o kształcie prostopadłościennym – typowym dla hali przemysłowej, z zastosowaniem statystycznej metody prognozowania poziomu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniach

- wizualizacje graficzne służące do niezależnej oceny wskaźników cząstkowych wpływających na wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny
- optymalizację lokalizacji maszyn i stanowisk pracy pod kątem minimalizacji szkodliwego oddziaływania hałasu na pracowników, za pomocą algorytmu genetycznego wykorzystującego do obliczania funkcji przystosowania pojęcie globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny
- prowadzenie badań weryfikacyjnych wskaźnika jakości akustycznej dzięki wprowadzaniu rzeczywistych danych modeli akustycznych składających się z maszyn i urządzeń oraz parametrów pomieszczenia przemysłowego
- prowadzenie badań weryfikacyjnych wskaźnika jakości akustycznej drogą modyfikacji parametrów wpływających na przebieg wartości i zakresy zmienności wskaźników cząstkowych globalnego wskaźnika jakości akustycznej.

7.2.2. Algorytm genetyczny do wspomagania prawidłowego rozmieszczenia maszyn z zastosowaniem globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny

Parametrami środowiska pracy podlegającymi optymalizacji są współrzędne geometryczne lokalizacji maszyn i stanowisk pracy. Możliwe są trzy modele (przypadki), w których optymalizacji podlegają:

- położenia stanowisk pracy
- położenia maszyn
- położenia stanowisk pracy i maszyn.

We wszystkich wymienionych przypadkach funkcja celu, F_C, umożliwiająca ocenę jakościową otrzymanych rozwiązań, jest zdefiniowana w postaci iloczynu globalnych wskaźników jakości akustycznej maszyn:

$$F_c = \min\left(\prod_{i=1}^{M}\prod_{j=k}^{N} Q_{GWAik}\right) \tag{7.4}$$

gdzie:

Q_{GWAik} – globalny wskaźnik jakości *i*-tej maszyny wyznaczony w miejscu *k*-tego stanowiska pracy

M – liczba maszyn w pomieszczeniu

N – liczba stanowisk pracy w pomieszczeniu.

Zgodnie z wcześniejszym stwierdzeniem w podrozdziale 7.2.1 przyjęto założenie, że wartości wskaźnika mocy akustycznej, Q_N, wskaźnika hałasu impulsowego, Q_{imp}, oraz wskaźnika rozkładu widma, Q_F, nie zależą od parametrów geometrycznych modelu środowiska pracy. Natomiast wskaźnikami, które wpływają na wartość funkcji celu są: wskaźnik odległości od maszyny, Q_R, i wskaźnik kierunkowości promieniowania, Q_Θ. W związku z tym wyrażenie (7.4) można zapisać w postaci (7.5):

$$F_c = \min\left(\prod_{i=1}^{M} \prod_{j=\text{k}}^{N} Q_{Rik} \cdot Q_{\Theta ik} \right) \tag{7.5}$$

gdzie:

Q_{Rik} – wskaźnik odległości *i*-tej maszyny wyznaczony w miejscu *k*-tego stanowiska pracy

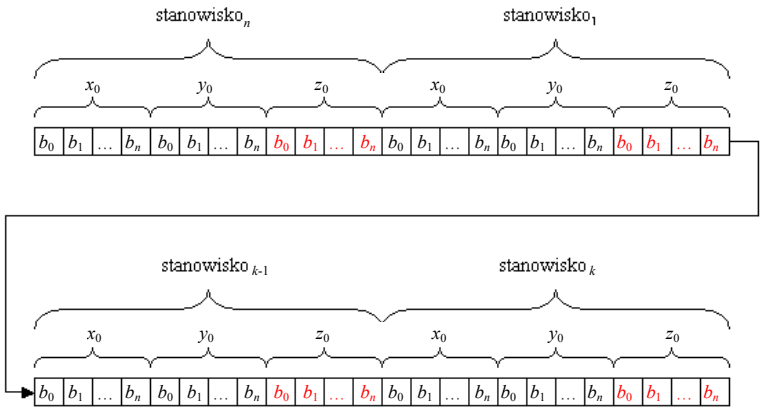
$Q_{\Theta ik}$ – wskaźnik kierunkowości promieniowania *i*-tej maszyny wyznaczony w miejscu *k*-tego stanowiska pracy.

Jak podano już w podrozdziale 7.1, algorytm genetyczny przeszukuje przestrzeń alternatywnych rozwiązań problemu, w której istnieje pewna populacja osobników. Jednocześnie każdy z osobników ma przypisany pewien zbiór informacji stanowiących jego genotyp. Zatem genotyp opisuje proponowane rozwiązanie problemu, a funkcja celu ocenia, jak dobre jest to rozwiązanie. Z kolei genotyp składa się z chromosomów, w których są zakodowane: fenotyp (tj. zbiór cech podlegających ocenie funkcji celu) oraz wybrane informacje pomocnicze dla algorytmu genetycznego [45].

Zakodowanie informacji o proponowanym rozwiązaniu w chromosomie jest jednym z zasadniczych etapów projektowania algorytmu. Ma ono decydujący wpływ na szybkość i jakość znajdowanych wyników. Zapewnia przeszukanie całej przestrzeni rozwiązań. W przypadku niewłaściwego zakodowania może zaistnieć sytuacja, że nigdy nie zostanie przeszukany fragment przestrzeni, w którym znajdują się najlepsze rozwiązania [45].

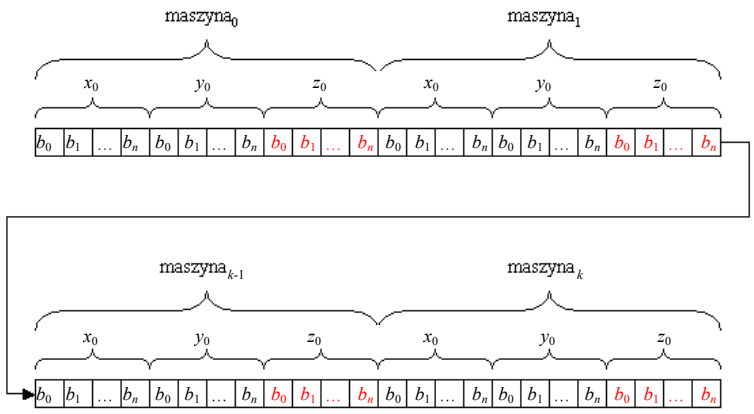
Dlatego sposób kodowania chromosomu zależy od zastosowanego modelu optymalizacji współrzędnych geometrycznych lokalizacji maszyn i stanowisk pracy. W przypadku modelu z optymalizacją jedynie położeń stanowisk pracy (przy ustalonych, niezmiennych lokalizacjach maszyn) w chromosomie są zakodowane współrzędne genetyczne lokalizacji stanowisk pracy. Natomiast współrzędne przestrzenne maszyn są uwzględniane na etapie wyznaczania minimum funkcji celu określonej zależnością (7.5), co przedstawiono na rys. 7.1.

Taki sposób kodowania powoduje, że w trakcie optymalizacji położenia maszyn pozostają niezmienione, mimo że algorytm poszukuje optymalnych lokalizacji stanowisk pracy.



Rys. 7.1. Chromosom zawierający współrzędne stanowisk pracy

W kolejnym opracowanym modelu dokonuje się jedynie optymalizacji położeń maszyn (przy ustalonych, niezmiennych lokalizacjach stanowisk pracy). W tym przypadku w chromosomie są zakodowane współrzędne geometryczne lokalizacji maszyn (rys. 7.2), natomiast współrzędne geometryczne lokalizacji stanowisk pracy uwzględnia się na etapie wyznaczania minimum funkcji celu określonej zależnością (7.5).



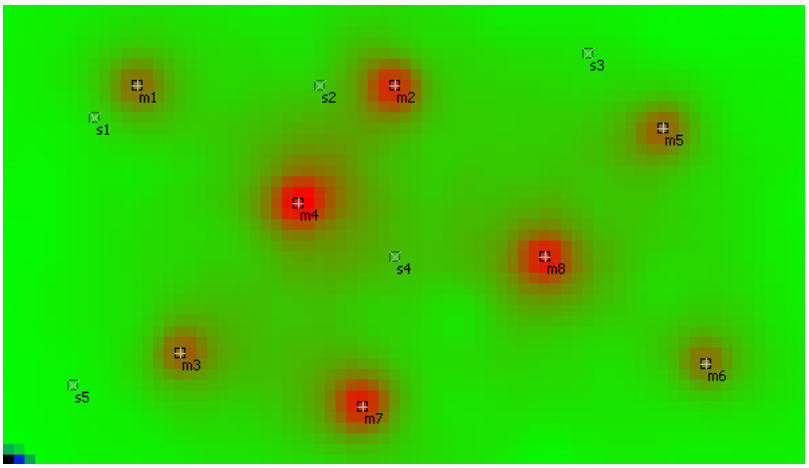
Rys. 7.2. Chromosom zawierający współrzędne maszyn

Omówiony sposób kodowania powoduje, że w trakcie optymalizacji położenia stanowisk pracy pozostają niezmienione, podczas gdy algorytm poszukuje optymalnych lokalizacji maszyn. Wyniki działania tego algorytmu przedstawiono na rys. 7.3 i rys. 7.4.

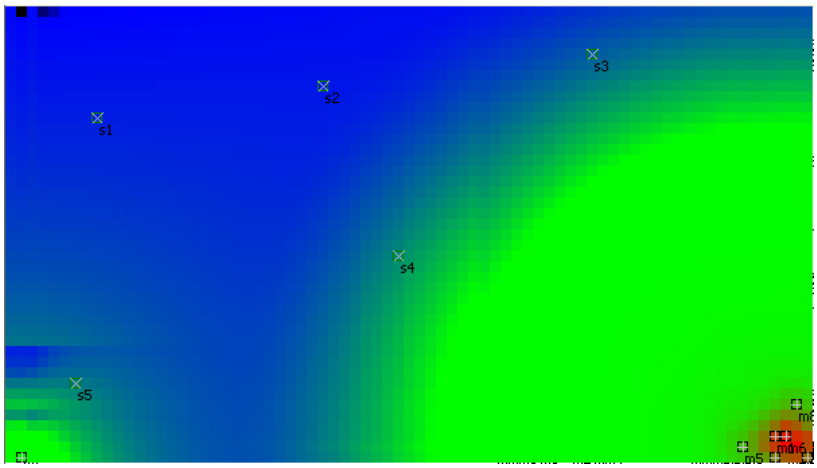
Na rys. 7.3 przedstawiono lokalizację pięciu stanowisk pracy w pomieszczeniu przed optymalizacją (oznaczonych jako s1–s5) oraz siedmiu maszyn (oznaczonych jako m1–m7) na tle rozkładu wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA}. Na rys. 7.3 i 7.4 przyjęto następujący kod kolorystyczny:

- kolor niebieski oznacza, że wartość wskaźnika $Q_{GWA} \leq 0{,}5$, przy czym im kolor jest ciemniejszy, tym wartość wskaźnika Q_{GWA} jest mniejsza
- kolor zielony oznacza, że wartość wskaźnika jest w granicach $0{,}5 < Q_{GWA} \leq 1$, przy czym im kolor jest ciemniejszy, tym wartość wskaźnika Q_{GWA} jest mniejsza
- kolor czerwony oznacza, że wartość wskaźnika $Q_{GWA} > 1$, przy czym im kolor jest ciemniejszy, tym wartość wskaźnika Q_{GWA} jest mniejsza.

Przed zrealizowaniem procedury optymalizacji (rys. 7.3) wartości wskaźnika Q_{GWA} na każdym ze stanowisk pracy (s1–s5) nie przekraczały 1, lecz były większe od 0,5.



Rys. 7.3. Lokalizacja maszyn (m1–m7) i stanowisk pracy (s1–s5) w pomieszczeniu na tle rozkładu wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej przed optymalizacją

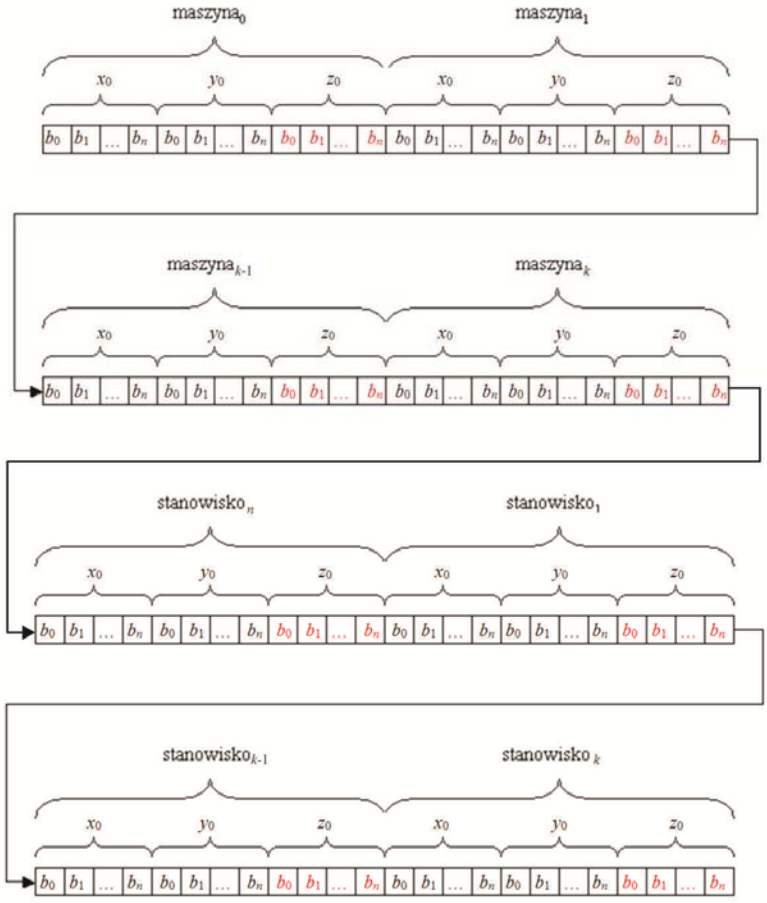


Rys. 7.4. Lokalizacja maszyn (m1–m7) i stanowisk pracy (s1–s5) w pomieszczeniu na tle rozkładu wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej po optymalizacji

Końcowy wynik działania algorytmu genetycznego przedstawiony na rys. 7.4 odnosi się do przypadku, gdy na współrzędne geometryczne lokalizacji maszyn nie zostały nałożone żadne ograniczenia z wyjątkiem warunku, że muszą się zawierać wewnątrz pomieszczenia. Efektem tego działania było umieszczenie sześciu maszyn w jednym z rogów pomieszczenia (prawy dolny róg na

rys. 7.4) oraz jednej maszyny w innym rogu pomieszczenia (lewy dolny róg na rys. 7.4). Lokalizacje stanowisk pracy s1–s5 pozostały oczywiście niezmienne, ale uzyskano zmniejszenie wartości wskaźnika Q_{GWA} poniżej 0,5 na każdym z tych stanowisk pracy.

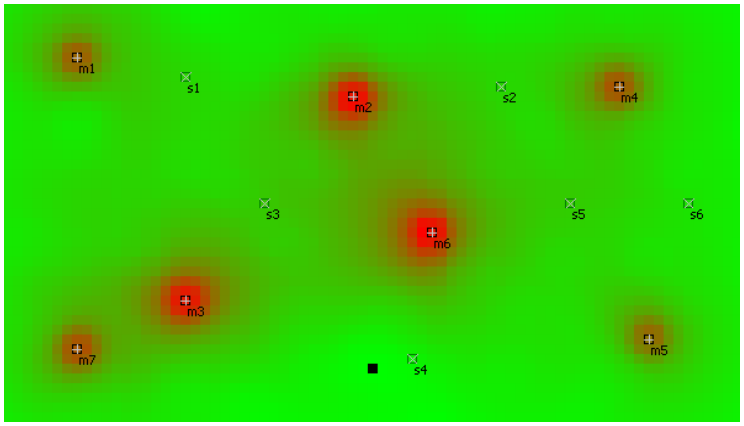
Ostatni z opracowanych modeli dotyczy optymalizacji położeń maszyn i stanowisk pracy. W chromosomie są zakodowane współrzędne geometryczne ich lokalizacji (rys. 7.5). Dlatego w trakcie optymalizacji zmianie podlegają zarówno położenia maszyn, jak i stanowisk pracy.



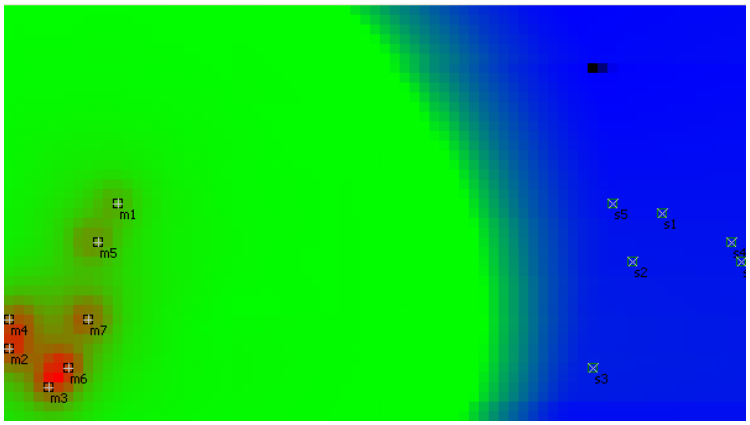
Rys. 7.5. Chromosom zawierający współrzędne maszyn i stanowisk pracy

Zachowując takie same jak na rys. 7.3 i 7.4 oznaczenia maszyn i stanowisk pracy oraz taki sam kod kolorystyczny obszarów pomieszczenia i wartości Q_{GWA}, na rys. 7.6 przedstawiono lokalizację w pomieszczeniu przed optymalizacją sze-

ściu stanowisk pracy (s1–s6) oraz siedmiu maszyn (m1–m7) na tle rozkładu wartości wskaźnika Q_{GWA}. Dla tego przypadku wartości wskaźnika Q_{GWA} na każdym z tych stanowisk pracy nie przekraczały 1, lecz były większe od 0,5.



Rys. 7.6. Lokalizacja maszyn (m1–m7) i stanowisk pracy (s1–s6) na tle rozkładu wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej przed optymalizacją



Rys. 7.7. Lokalizacja maszyn (m1–m7) i stanowisk pracy (s1–s6) na tle rozkładu wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej po optymalizacji

Na rys. 7.7 pokazano wynik zrealizowanej procedury optymalizacji za pomocą opracowanego algorytmu dla przypadku, gdy na współrzędne geometryczne lokalizacji maszyn i stanowisk pracy nie zostały nałożone żadne ograniczenia z wyjątkiem warunku, że muszą się zawierać wewnątrz pomieszczenia.

W wyniku nowych lokalizacji maszyn i stanowisk pracy wartości wskaźnika Q_{GWA} na stanowiskach pracy zostały zmniejszone i wynosiły poniżej 0,5.

7.2.3. Zastosowanie algorytmu genetycznego w narzędziu informatycznym

Algorytm genetyczny opisany w podrozdziale 7.2.2 został zastosowany w narzędziu informatycznym (programie) umożliwiającym prognozowanie emisji hałasu maszyn oraz optymalizację lokalizacji maszyn i stanowisk pracy w pomieszczeniach eksploatacyjnych. Oprogramowanie napisano w języku C++. Składa się ono z zestawu klas umożliwiających:

- syntezę środowiska pracy na podstawie jego elementów składowych (pomieszczenie pracy, źródła hałasu i stanowiska pracy)
- wykonywanie obliczeń symulacyjnych dotyczących wskaźników cząstkowych oraz wskaźników globalnych jakości akustycznej maszyn
- wspomaganie rozmieszczania maszyn i stanowisk pracy pod kątem uzyskania jak najkorzystniejszych warunków pracy.

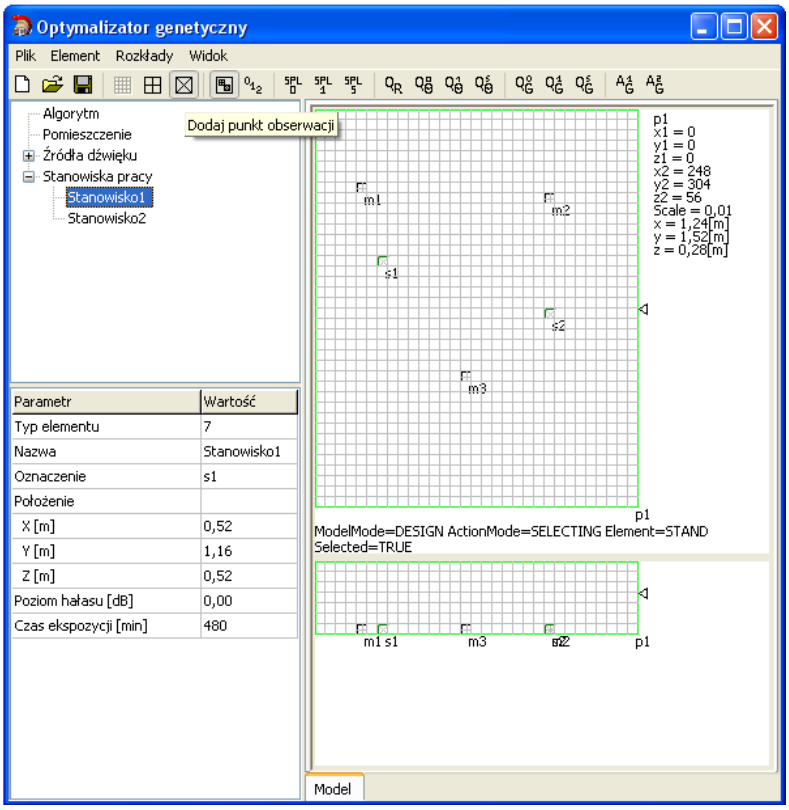
Zgodnie z założeniami podanymi w podrozdziale 7.2.1, opracowany program ma zastosowanie do typowych hal przemysłowych, tj. o kształcie prostopadłościennym. Struktura modelu obliczeniowego programu składa się z następujących elementów:

- algorytmu
- pomieszczenia
- źródła dźwięku
- stanowiska pracy.

Elementy te scharakteryzowano dalej w opisach zasadniczych etapów procedury tworzenia modelu obliczeniowego i wykonywania obliczeń symulacyjnych.

W pierwszym etapie działania programu (w ramach elementu „algorytm") wprowadzane są następujące parametry algorytmu genetycznego: liczebność populacji (liczba chromosomów), prawdopodobieństwo krzyżowania, prawdopodobieństwo mutacji oraz liczba iteracji. W następnym etapie działania programu (element „pomieszczenie") modelowane jest pomieszczenie eksploatacyjne – na podstawie wprowadzonych danych dotyczących wymiarów tego pomieszczenia oraz wartości współczynników pochłaniania

dźwięku ograniczających je powierzchni. Po dodaniu pomieszczenia do modelu środowiska pracy program automatycznie przechodzi do opcji dodawania elementów wyposażenia pomieszczenia, jakimi są maszyny i stanowiska pracy. Podczas dodawania maszyn drzewo reprezentujące strukturę modelu jest aktualizowane przez wprowadzenie danych dotyczących lokalizacji maszyn w pomieszczeniu oraz wartości wielkości charakteryzujących emisję hałasu (rys. 7.8 – każda maszyna jest reprezentowana za pomocą kwadratu i skrótu składającego się z litery „m" i indeksu liczbowego).



Rys. 7.8. Okno programu po wprowadzeniu maszyn (m1–m3) oraz stanowisk pracy (s1–s2)

W analogiczny sposób do modelu środowiska pracy są dodawane stanowiska pracy. Jednocześnie aktualizowane jest drzewo odwzorujące strukturę modelu. Na rys. 7.8 przedstawiono widok okna programu po dodaniu do modelu dwóch stanowisk oraz trzech maszyn – każde stanowisko pracy jest

reprezentowane za pomocą kwadratu i skrótu składającego się z litery „s" i indeksu liczbowego.

Po utworzeniu modelu obliczeniowego, tj. zdefiniowaniu parametrów algorytmu genetycznego oraz określeniu modelu środowiska pracy, można przystąpić do obliczeń symulacyjnych i optymalizacyjnych. Dalej przedstawiono wybrane wyniki przeprowadzonych symulacji mających na celu optymalizację położenia maszyn w hali przemysłowej, zapewniającą zmniejszenie narażenia na hałas na stanowiskach pracy. Jako kryterium zastosowano wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny, Q_{GWA}, dla modelu środowiska z rys. 7.8.

Wartości wskaźników kierunkowości promieniowania, Q_Θ, oraz globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny, Q_{GWA}, w wybranych przekrojach pomieszczenia mogą być wyznaczone następującymi metodami:

- na podstawie analizy rozkładu fal bezpośrednich emitowanych przez maszyny
- na podstawie analizy rozkładu fal bezpośrednich emitowanych przez maszyny oraz energii akustycznej związanej z pierwszym odbiciem od ścian ograniczających pomieszczenie
- na podstawie analizy rozkładu pola akustycznego z zastosowaniem metody statystycznej.

Na rys. 7.9 przedstawiono rozkład wartości wskaźnika kierunkowości promieniowania, Q_Θ, w poziomym przekroju pomieszczenia (w płaszczyźnie o współrzędnych $x = 0{,}52$; $y = 1{,}16$). Wartości wskaźnika zostały określone metodą statystyczną, a przyjęte na rysunku kody kolorystyczne są następujące:

- kolor zielony oznacza, że wartość wskaźnika jest w granicach $0{,}5 < Q_\Theta \leq 1$, przy czym im kolor jest ciemniejszy, tym wartość wskaźnika Q_Θ jest mniejsza
- kolor czerwony oznacza, że wartość wskaźnika $Q_\Theta > 1$, przy czym im kolor jest ciemniejszy, tym wartość wskaźnika Q_Θ jest mniejsza.

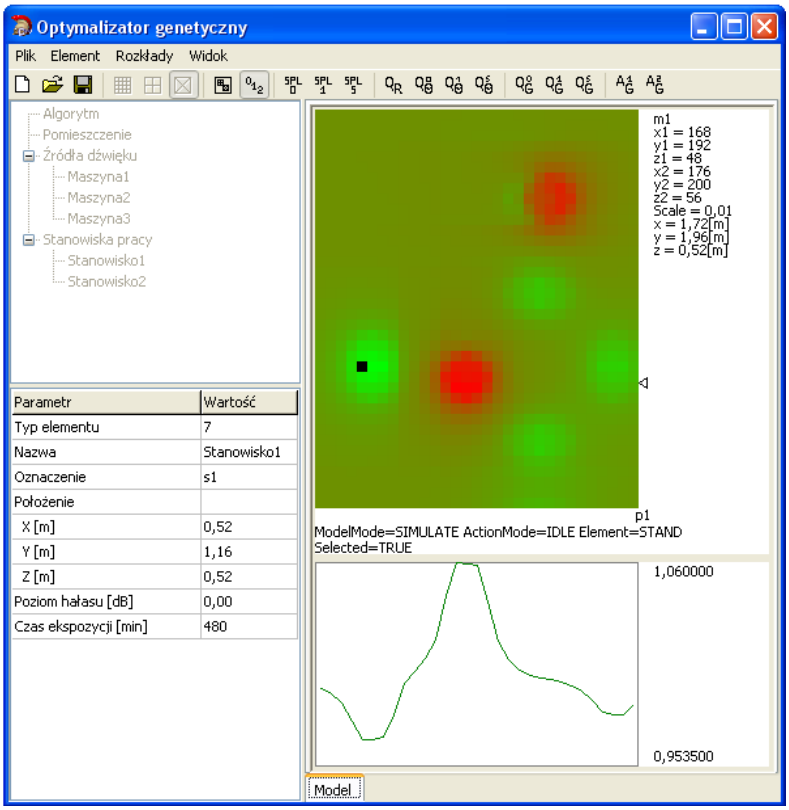
Wyznaczone wartości współczynnika promieniowania, Q_Θ, zawierają się w przedziale od 0,97 do 1,06.

Odpowiadający opisywanemu przypadkowi rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA} (obliczony także z użyciem metody staty-

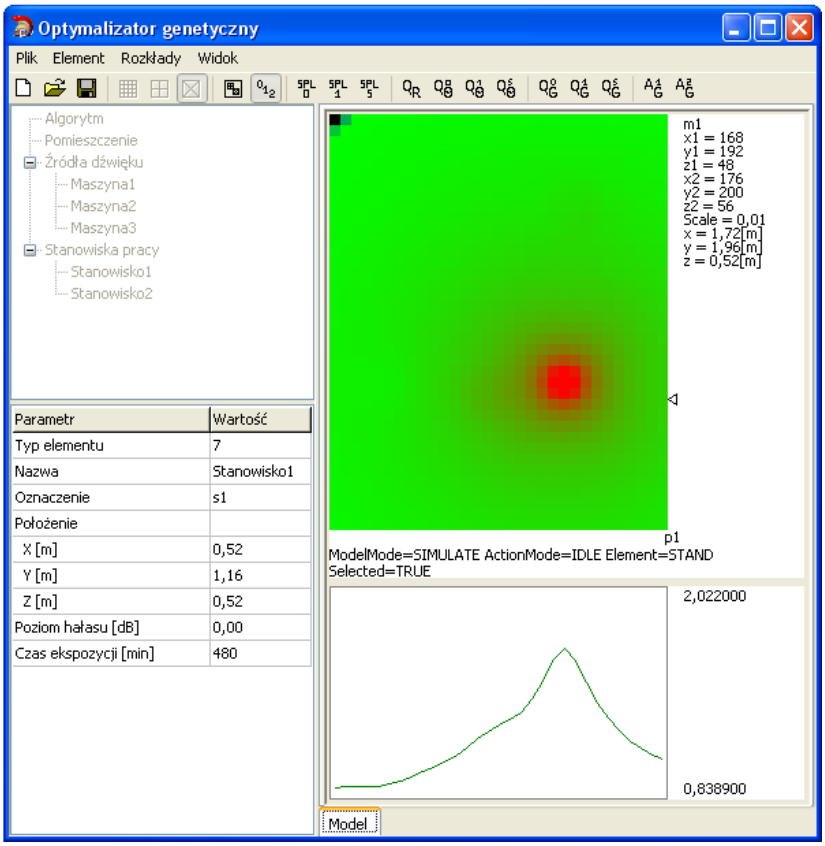
stycznej analizy pola akustycznego), przedstawiono na rys. 7.10, zachowując dotychczasową zasadę dotyczącą kodu kolorystycznego, tj.:

- kolor zielony oznacza, że wartość wskaźnika jest w granicach $0{,}5 < Q_{GWA} \leq 1$, przy czym im kolor jest ciemniejszy, tym wartość wskaźnika Q_{GWA} jest mniejsza
- kolor czerwony oznacza, że wartość wskaźnika $Q_{GWA} > 1$, przy czym im kolor jest ciemniejszy, tym wartość wskaźnika Q_{GWA} jest mniejsza.

Wyznaczone wartości wskaźnika Q_{GWA} wahają się w granicach od ok. 0,91 do 1,67 (w wybranej płaszczyźnie o współrzędnych $x = 0{,}52$ i $y = 1{,}16$ (dolny wykres na rys. 7.10).



Rys. 7.9. Okno programu – rozkład wartości wskaźnika kierunkowości promieniowania, Q_Θ, w przekroju poziomym pomieszczenia (rysunek górny) oraz w płaszczyźnie wyznaczonej przez kursor „◁” (rysunek dolny)



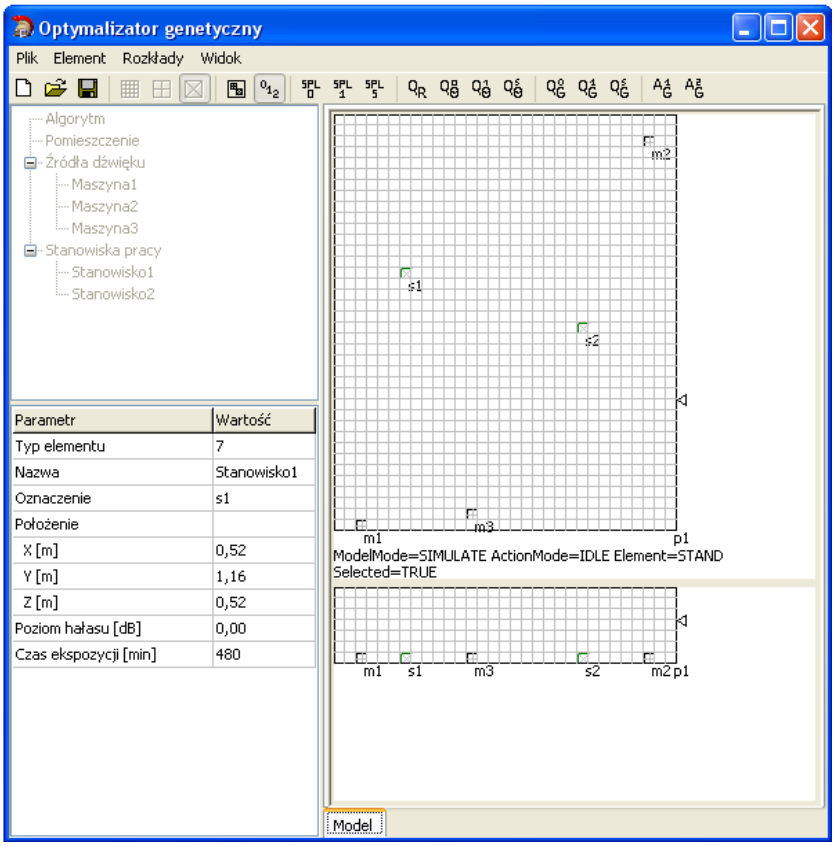
Rys. 7.10. Okno programu – rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA}, w przekroju poziomym pomieszczenia (rysunek górny) oraz w płaszczyźnie wyznaczonej przez kursor „◁" (rysunek dolny)

Przykładowo przyjęto, dla pierwotnego rozmieszczenia maszyn i stanowisk pracy przedstawionego na rys. 7.8, następujące parametry algorytmu genetycznego:

- liczebność populacji: 500 chromosomów
- prawdopodobieństwo krzyżowania: 0,6
- prawdopodobieństwo mutacji: 0,001
- liczba iteracji: 20.

Przeprowadzono badania, których celem było wyznaczenie optymalnych lokalizacji maszyn w taki sposób, aby uzyskać jak najmniejszą wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej dla wszystkich maszyn i stanowisk pracy ujętych na rys. 7.8. Podczas tych badań algorytm genetyczny znalazł optymalne

współrzędne geometryczne położenia maszyn ze względu na minimalizację narażenia na hałas, a następnie za pomocą programu odwzorowane zostało zmodyfikowane rozmieszczenie maszyn. Wynik tego działania przedstawiono na rys. 7.11.

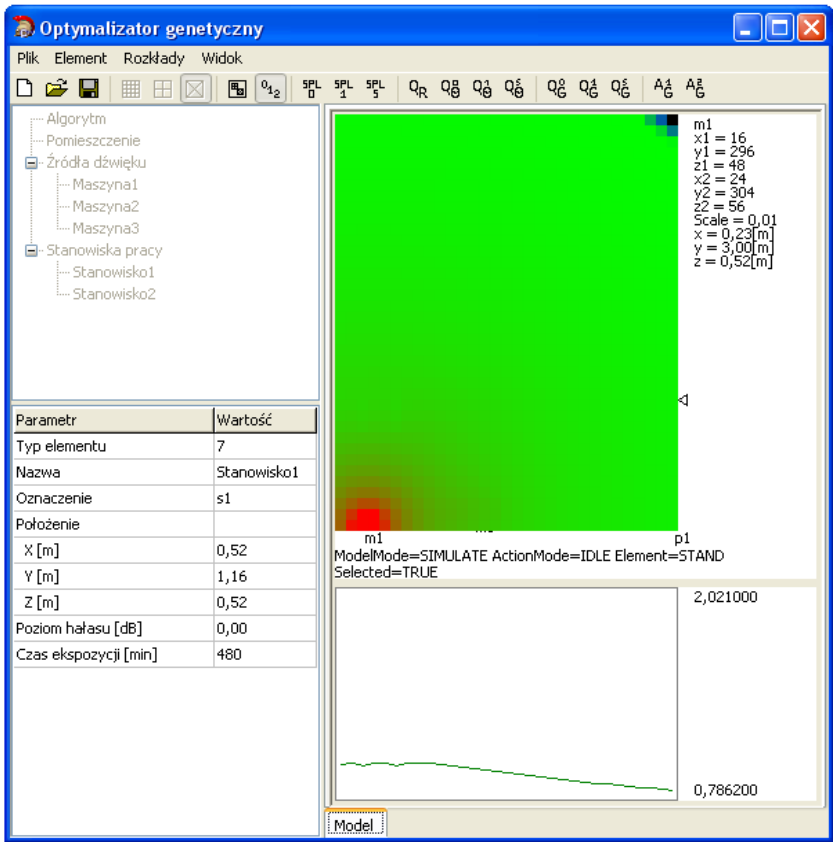


Rys. 7.11. Okno programu – zoptymalizowane położenia maszyn (m1–m3) i stanowisk pracy (s1–s2), których pierwotną lokalizację przedstawiono na rys. 7.8

Dla wyznaczonych przez algorytm genetyczny optymalnych współrzędnych geometrycznych położenia maszyn można wykonać symulacje dotyczące rozkładów wskaźników jakości akustycznej (cząstkowych oraz globalnych) w wybranych przekrojach pomieszczenia. Przykładowy wynik takiej symulacji komputerowej pokazano na rys. 7.12. Przedstawiono na nim rozkład globalnego wskaźnika jakości, Q_{GWA}, po modyfikacji położeń maszyn wyznaczonych za

pomocą algorytmu genetycznego. W trakcie symulacji komputerowej wartości cząstkowego wskaźnika kierunkowości promieniowania, Q_Θ (będącego składową wskaźnika globalnego), wyznaczono metodą statystycznej analizy pola akustycznego wewnątrz pomieszczenia.

Dla takiej samej płaszczyzny jak na rys. 7.10 wartości Q_{GWA} (po optymalizacji położeń maszyn) są mniejsze i zawierają się w przedziale od 0,86 do 1 (przed optymalizacją wartości Q_{GWA} mieściły się w zakresie 0,91 do 1,67).

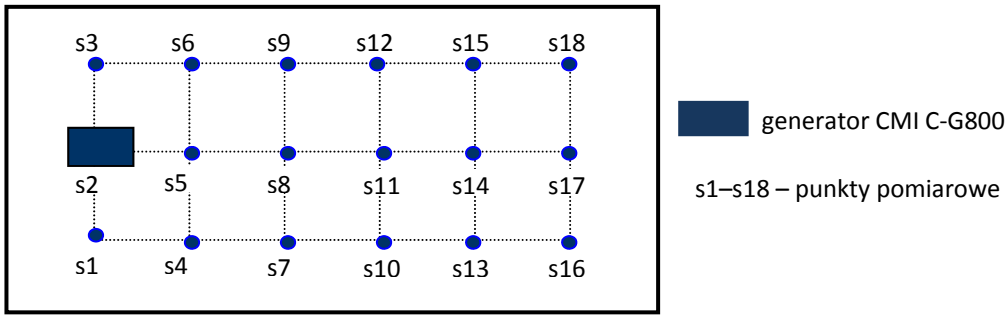


Rys. 7.12. Okno programu – rozkład globalnego wskaźnika jakości, Q_{GWA}, po modyfikacji położeń maszyn za pomocą algorytmu genetycznego

7.3. Prognozowanie hałasu w pomieszczeniach oraz optymalizacja lokalizacji maszyn i stanowisk pracy – badania laboratoryjne i symulacyjne

W celu potwierdzenia poprawności opracowanego oprogramowania do prognozowania emisji hałasu maszyn i optymalizacji ich lokalizacji w pomieszczeniach przemysłowych przeprowadzono wiele obliczeń symulacyjnych, wykorzystując dane charakteryzujące rzeczywiste zarówno źródła hałasu jak i rzeczywiste pomieszczenia eksploatacyjne.

W pierwszej fazie zrealizowano badania laboratoryjne – wyznaczono rozkłady poziomów ciśnienia akustycznego wokół generatora prądotwórczego CMI C-G800 (800 W) w równomiernie rozłożonej siatce punktów pomiarowych w pomieszczeniu typu przemysłowego (rys. 7.13), o wymiarach 6,46 × 3,15 × 3,36 m. Pomieszczenie miało betonową podłogę, jedna z dłuższych ścian była wykonana z płyt poliwęglanowych, druga (betonowa) – była wytynkowana, jedna z krótszych ścian była wykonana z cegły pokrytej tynkiem, a przeciwległą ścianę stanowiły drzwi z PCV otwarte podczas wszystkich serii pomiarowych. Sufit z kolei był wykończony tynkiem na betonie.



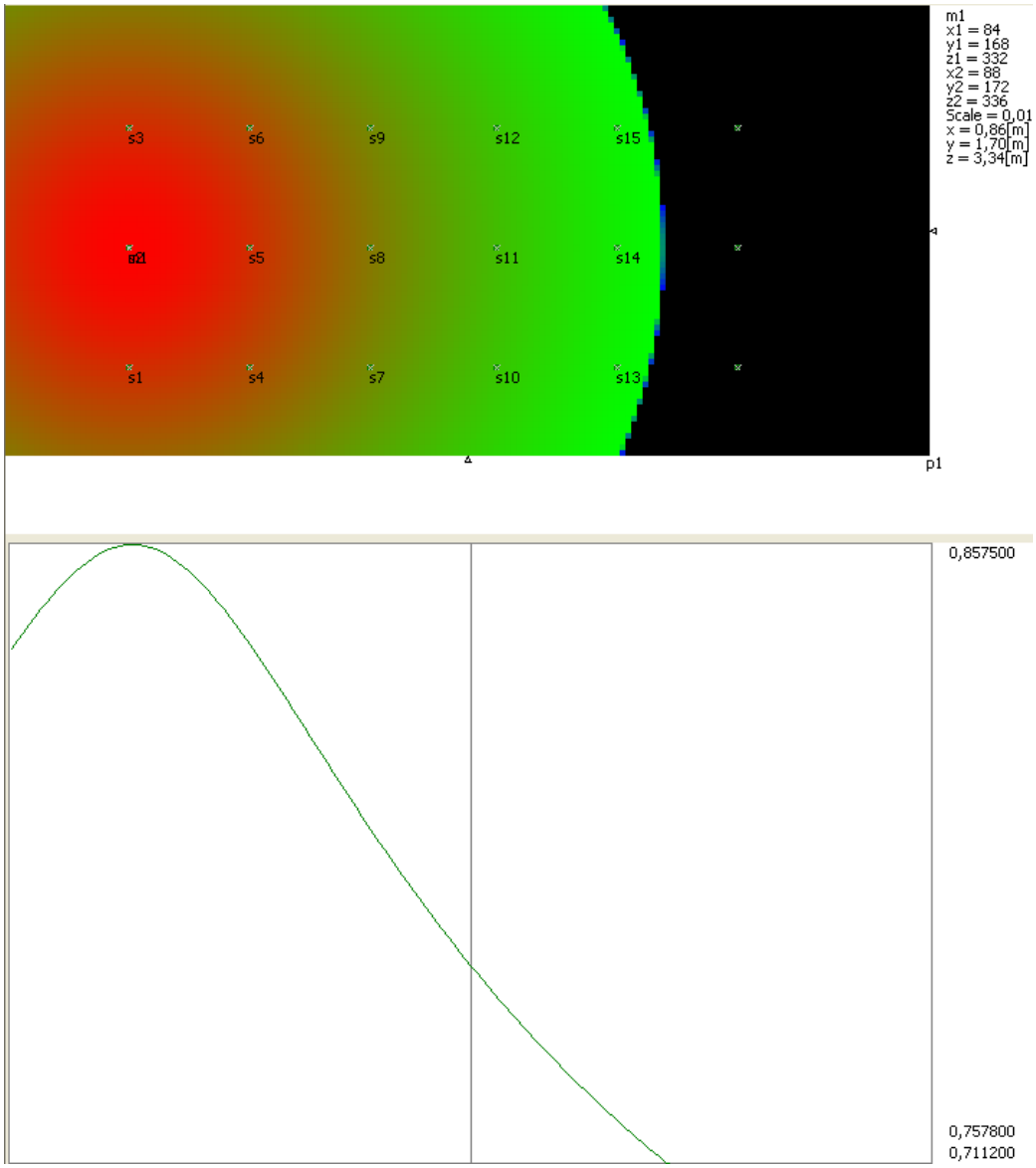
Rys. 7.13. Rozmieszczenie generatora i punktów pomiarowych w pomieszczeniach badawczych – generator CMI C-G800 W umieszczony w punkcie s2

W tab. 7.1 zamieszczono zmierzone wartości poziomu ciśnienia akustycznego dla przedstawionego przypadku.

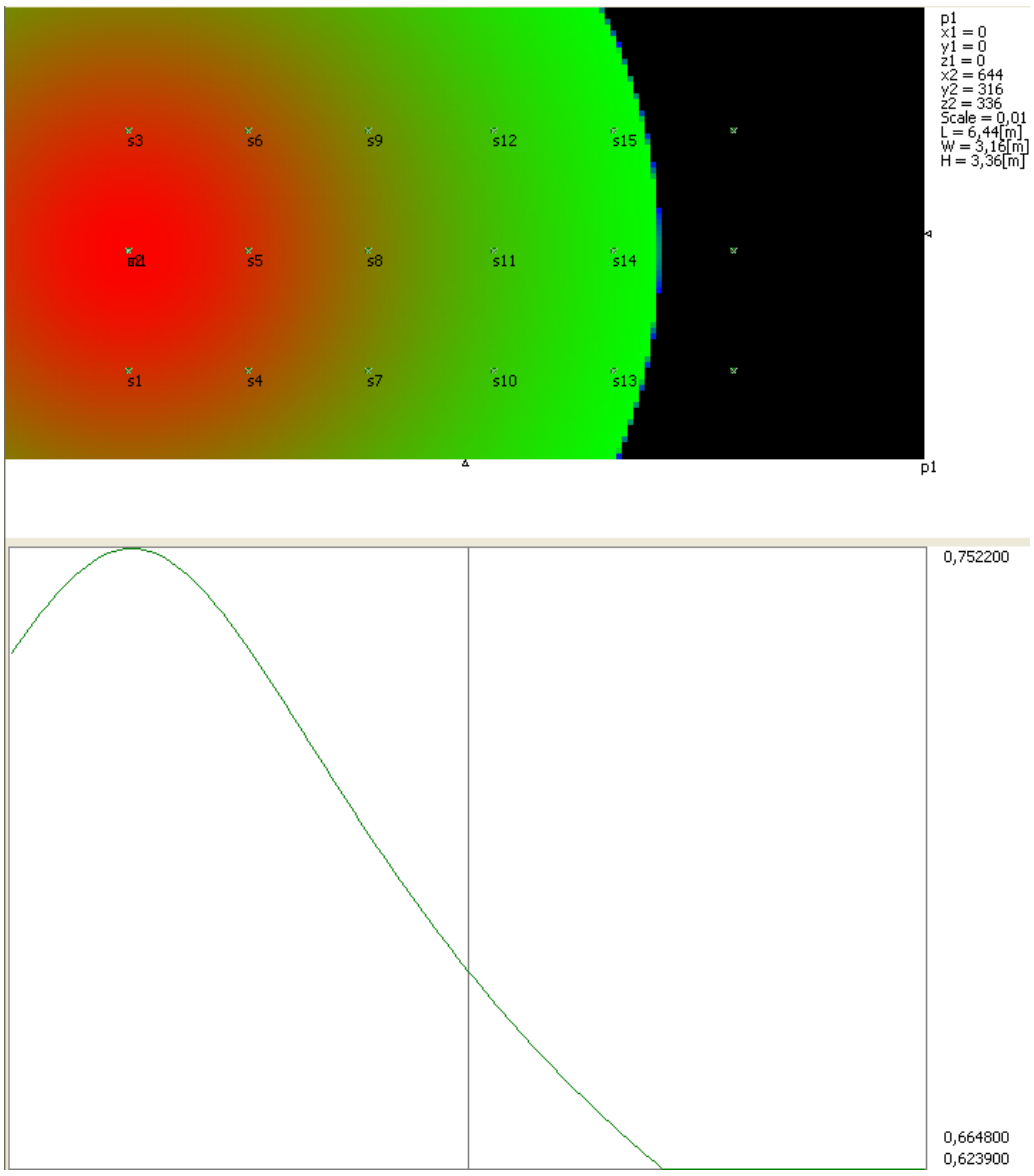
Tabela 7.1. Poziom dźwięku w 18 punktach pomiarowych rozmieszczonych w pomieszczeniu wokół generatora prądotwórczego CMI C-G800 800W (zlokalizowanego jak na rys. 7.13)

Punkt pomiarowy	Poziom dźwięku w punkcie pomiarowym, dB	
	L_A	L_{Cpeak}
s1	77,0	94,9
s2	77,4	95,2
s3	77,6	97,5
s4	77,5	94,2
s5	78,1	95,8
s6	77,5	95,0
s7	76,8	94,2
s8	77,1	93,6
s9	77,0	95,1
s10	76,3	93,7
s11	75,7	93,7
s12	76,2	94,2
s13	75,1	92,4
s14	75,0	91,4
s15	75,5	92,7
s16	74,7	91,6
s17	75,1	91,4
s18	74,7	92,5

W drugiej fazie eksperymentu, za pomocą opracowanego narzędzia komputerowego (przyjęto parametry algorytmu genetycznego podane w podrozdziale 7.2.3), utworzono model środowiska pracy. Na rys. 7.14 i 7.15 przedstawiono odpowiednio rozkłady wartości wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny, Q_R, i globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA}, w przekroju poprzecznym pomieszczenia, uzyskane w badaniach symulacyjnych. Wartości tych wskaźników maleją ze wzrostem odległości od generatora. Cząstkowy wskaźnik Q_R osiąga największą wartość, wynoszącą 0,8575, w bezpośredniej bliskości generatora, natomiast najmniejszą, wynoszącą 0,7112, w obszarze, w którym znajdują się punkty pomiarowe o symbolach od s13 do s18. Taki sam charakter ma rozkład wskaźnika globalnego, Q_{GWA}. Wartości mieszczą się w granicach od 0,7522 w bezpośredniej bliskości generatora do 0,6239 w obszarze, w którym znajdują się punkty pomiarowe o symbolach od s13 do s18.



Rys. 7.14. Rozkład wartości wskaźnika cząstkowego odległości stanowiska pracy od maszyny, Q_R, w przekroju poprzecznym pomieszczenia na wysokości 1 m



Rys. 7.15. Rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny, Q_{GWA}, w przekroju poprzecznym pomieszczenia na wysokości 1 m

W tab. 7.2 przedstawiono wyniki tej serii badań symulacyjnych, podając wartości poziomu dźwięku A (podane w tab. 7.2 jako SPL_S) wyznaczone w punktach pomiarowych s1–s18 oraz wartości wskaźników cząstkowych (odległości stanowiska pracy od maszyny Q_R i kierunkowości promieniowania Q_Θ) i globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA}. Potwierdzeniem poprawności obliczeń zrealizowanych za pomocą programowania są wartości poziomów dźwięku A zmierzone w ramach badań eksperymentalnych – podane również w tab. 7.2 jako SPL_p.

Tabela 7.2. Wartości poziomu dźwięku A zmierzonego (SPL_p) i obliczonego (SPL_s) oraz wartości wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny, Q_R, wskaźnika kierunkowości promieniowania, Q_Θ, i wskaźnika globalnego, Q_{GWA}, w punktach pomiarowych s1–s18

	SPL_p	77,0	dB		SPL_p	76,8	dB		SPL_p	75,1	dB
	SPL_s	77,2	dB		SPL_s	76,7	dB		SPL_s	76,4	dB
s1	Q_R	0,83		s7	Q_R	0,78		s13	Q_R	0,72	
	Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00	
	Q_{GWA}	0,73			Q_{GWA}	0,68			Q_{GWA}	0,63	
	SPL_p	77,4	dB		SPL_p	77,1	dB		SPL_p	75,0	dB
	SPL_s	77,5	dB		SPL_s	76,8	dB		SPL_s	76,4	dB
s2	Q_R	0,86		s8	Q_R	0,79		s14	Q_R	0,72	
	Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00	
	Q_{GWA}	0,75			Q_{GWA}	0,69			Q_{GWA}	0,63	
	SPL_p	77,6	dB		SPL_p	77,0	dB		SPL_p	75,5	dB
	SPL_s	77,2	dB		SPL_s	76,7	dB		SPL_s	76,4	dB
s3	Q_R	0,83		s9	Q_R	0,78		s15	Q_R	0,72	
	Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00	
	Q_{GWA}	0,73			Q_{GWA}	0,68			Q_{GWA}	0,63	
	SPL_p	77,5	dB		SPL_p	76,3	dB		SPL_p	74,7	dB
	SPL_s	77,0	dB		SPL_s	76,5	dB		SPL_s	76,3	dB
s4	Q_R	0,81		s10	Q_R	0,74		s16	Q_R	0,71	
	Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00	
	Q_{GWA}	0,71			Q_{GWA}	0,65			Q_{GWA}	0,62	

Tabela 7.2, cd.

	SPL_p	78,1	dB		SPL_p	75,7	dB		SPL_p	75,1	dB
	SPL_s	77,2	dB		SPL_s	76,6	dB		SPL_s	76,3	dB
s5	Q_R	0,83		s11	Q_R	0,75		s17	Q_R	0,71	
	Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00	
	Q_{GWA}	0,73			Q_{GWA}	0,66			Q_{GWA}	0,62	
	SPL_p	77,5	dB		SPL_p	76,2	dB		SPL_p	74,7	dB
	SPL_s	77,0	dB		SPL_s	76,5	dB		SPL_s	76,3	dB
s6	Q_R	0,81		s12	Q_R	0,74		s18	Q_R	0,71	
	Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00			Q_Θ	1,00	
	Q_{GWA}	0,71			Q_{GWA}	0,65			Q_{GWA}	0,62	

Różnice pomiędzy wartościami poziomu dźwięku A zmierzonymi w punktach pomiarowych pokazanych na rys. 7.13 a wartościami obliczonymi w tych punktach za pomocą opracowanego oprogramowania zawierają się w granicach od 0,1 do 1,6 dB. Dla zdecydowanej większości punktów pomiarowych różnica ta nie przekracza 0,5 dB (w dziesięciu punktach pomiarowych), a tylko w czterech jest większa od 1 dB.

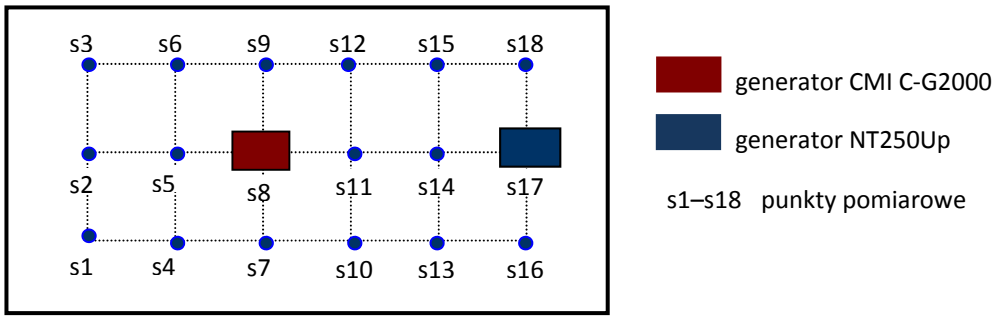
Jak już wcześniej wspomniano, na podstawie wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, można wykonać:

- optymalizację lokalizacji maszyn w pomieszczeniu
- optymalizację lokalizacji stanowisk pracy w pomieszczeniu
- optymalizację jednoczesną lokalizacji maszyn i stanowisk pracy w pomieszczeniu przemysłowym.

Działania optymalizacyjne są ukierunkowane na minimalizację hałasu na stanowiskach pracy, a także poprawę klimatu akustycznego w pomieszczeniu, a ich skuteczność jest tym większa, im mniejsza jest wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej. Dalej przedstawiono przykład badań symulacyjnych obejmujących wymienione działania optymalizacyjne. W badaniach przyjęto, oprócz minimalizacji wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, następujące założenia:

- odległość maszyn i stanowisk pracy od ścian ograniczających pomieszczenie nie może być mniejsza niż 0,45 m
- minimalna odległość między stanowiskami pracy wynosi 0,5 m.

Na rys. 7.16 przedstawiono rozmieszczenie stanowisk pracy (oznaczonych symbolami od s1 do s18) oraz lokalizację dwóch generatorów w pomieszczeniu przed działaniami optymalizacyjnymi. Odpowiadający tej konfiguracji rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej przedstawiono na rys. 7.17. Największe wartości wskaźnika Q_{GWA}, wynoszące ok. 0,77, zaobserwowano na stanowiskach oznaczonych jako s13, s14 i s15 (czyli w obszarze znajdującym się pomiędzy źródłami hałasu).

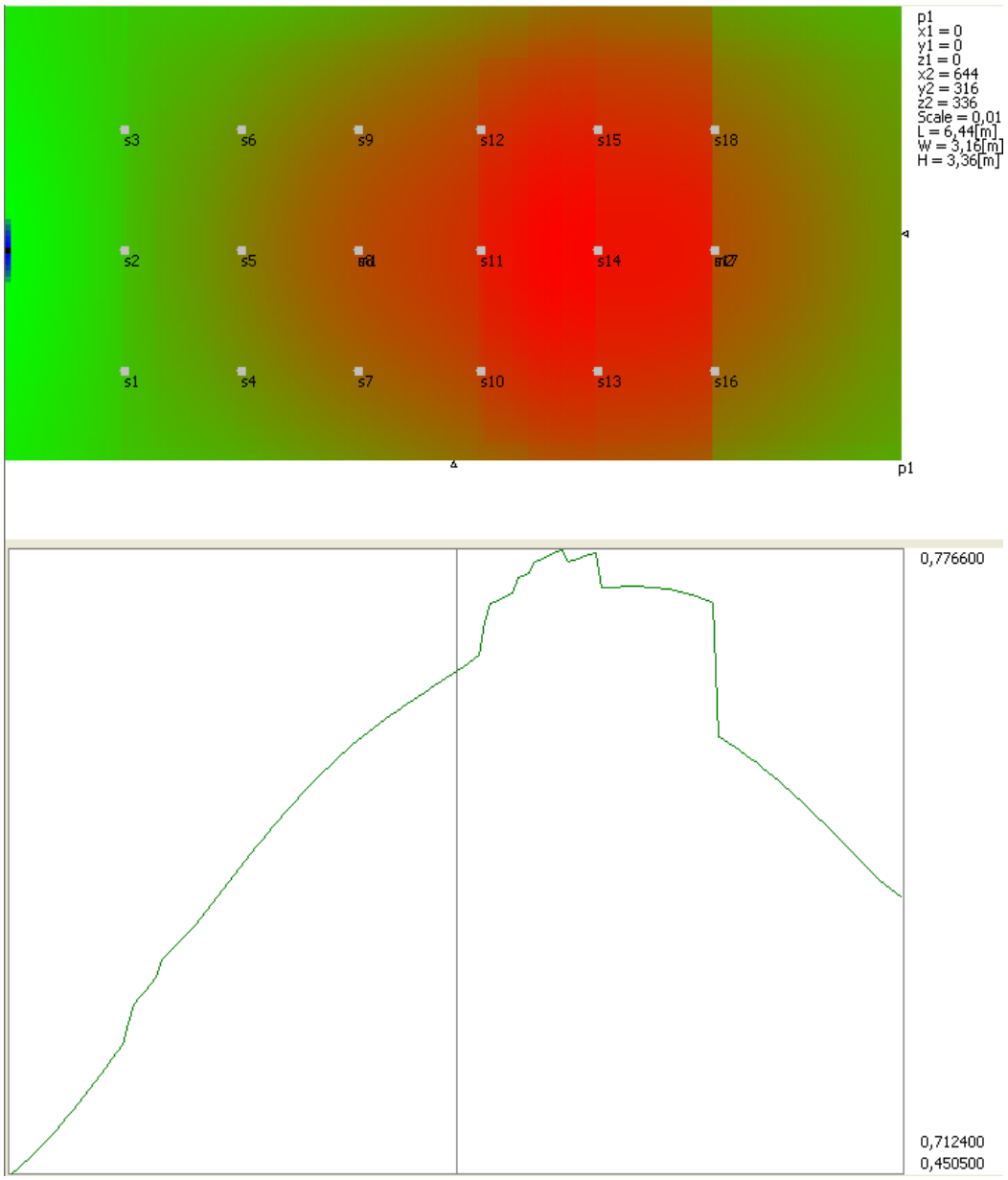


Rys. 7.16. Rozmieszczenie (przed optymalizacją) stanowisk pracy i maszyn w pomieszczeniu przemysłowym; generator CMI C-G2000 w punkcie s8, generator NT250Up w punkcie s17

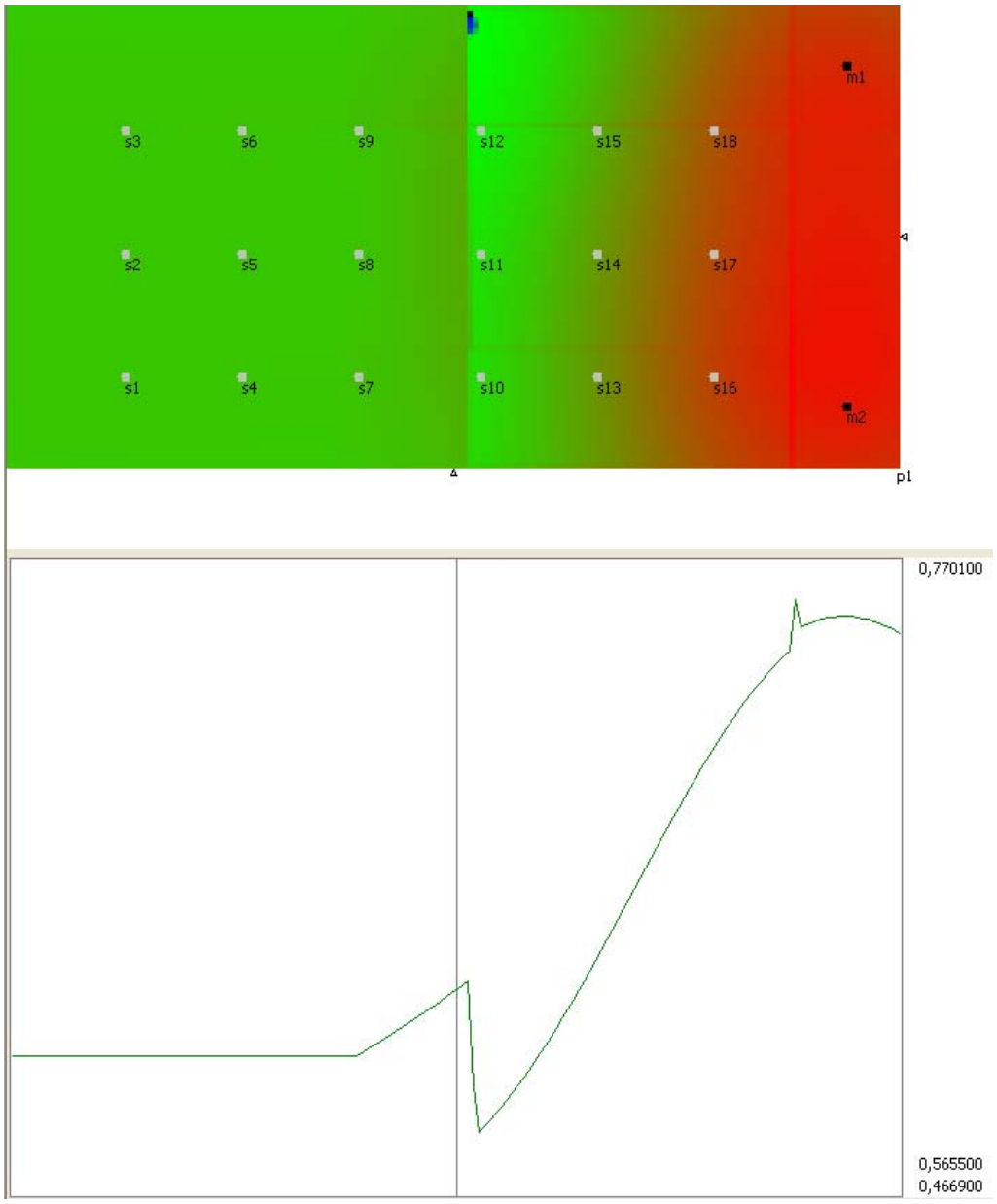
Kolejne rysunki pokazują wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych:

- lokalizacja generatorów w pomieszczeniu po optymalizacji, bez zmian lokalizacji stanowisk pracy, oraz rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej po procesie optymalizacji – rys. 7.18
- lokalizacja stanowisk pracy w pomieszczeniu po optymalizacji, bez zmian położenia generatorów, oraz rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej po optymalizacji – rys. 7.19
- lokalizacja stanowisk pracy i generatorów po optymalizacji łącznej oraz rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej po optymalizacji – rys. 7.20.

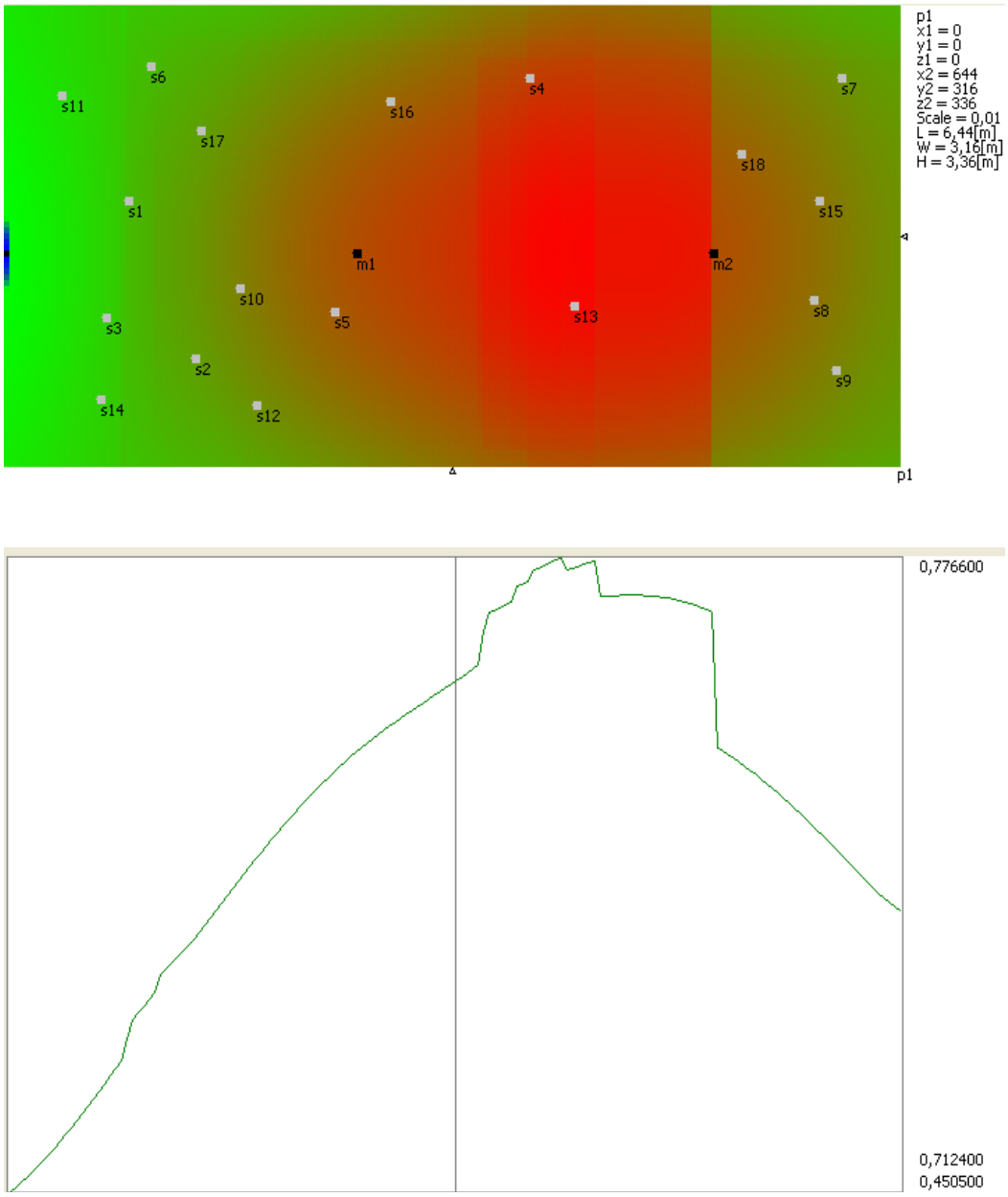
Wartości globalnych wskaźników jakości akustycznej uzyskane po optymalizacji przedstawiono w tab. 7.3.



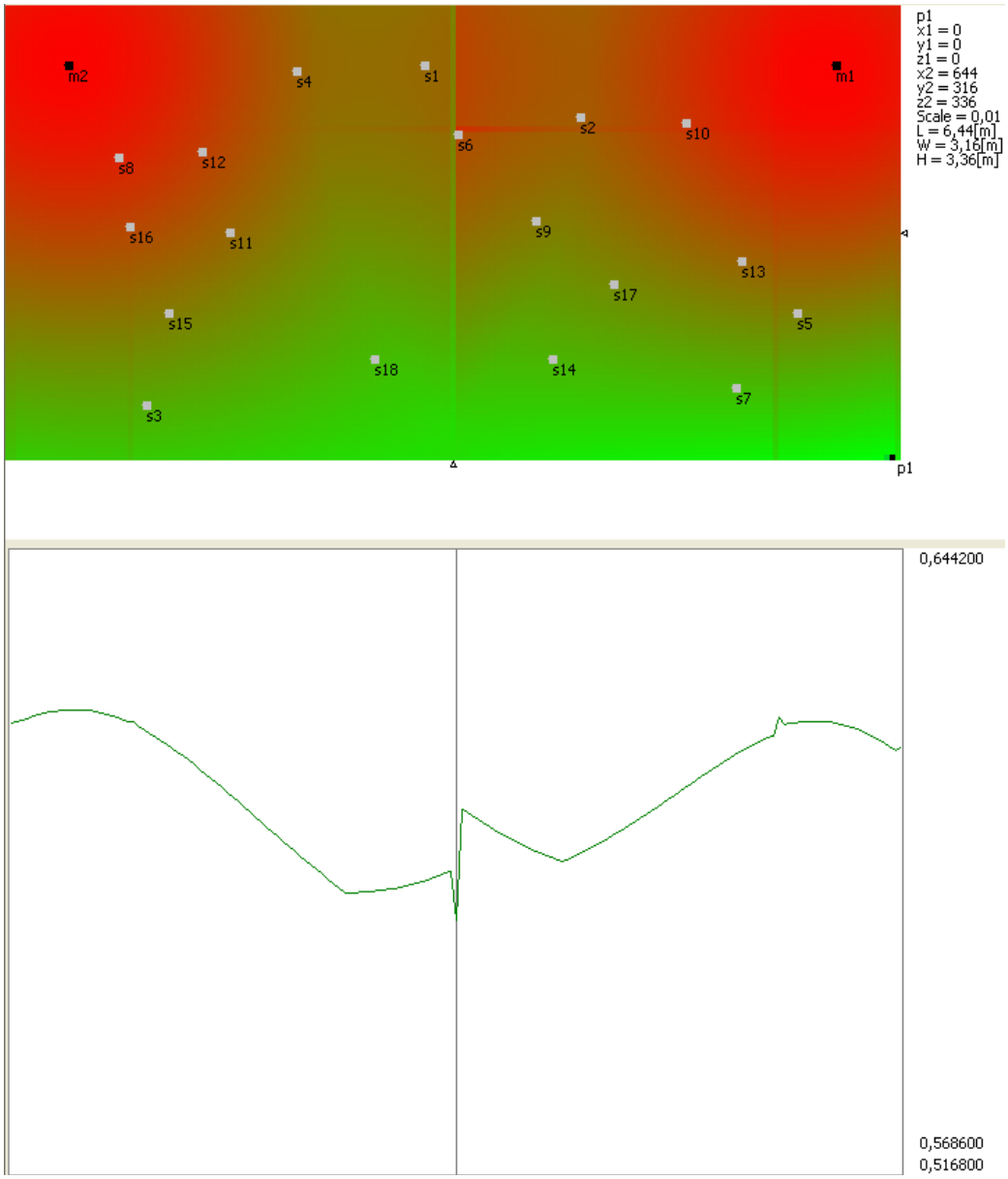
Rys. 7.17. Rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA}, w przekroju poprzecznym pomieszczenia na wysokości 1 m dla konfiguracji źródeł hałasu i stanowisk pracy jak na rys. 7.16



Rys. 7.18. Lokalizacja generatorów CMI C-G2000 (m1) i NT250Up (m2) po optymalizacji, bez zmian lokalizacji stanowisk pracy, oraz rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA1}, w przekroju poprzecznym pomieszczenia na wysokości 1 m; s1–s18 – stanowiska pracy



Rys. 7.19. Lokalizacja stanowisk pracy po optymalizacji, bez zmian lokalizacji generatorów (generatory CMI C-G2000 – m1 i NT250Up – m2) oraz rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA2}, w przekroju poprzecznym pomieszczenia na wysokości 1 m, po procesie optymalizacji; s1–s18 – stanowiska pracy



Rys. 7.20. Lokalizacje generatorów CMI C-G2000 (m1) i NT250Up (m2) i stanowisk pracy po optymalizacji oraz rozkład wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej, Q_{GWA3}, w przekroju poprzecznym pomieszczenia na wysokości 1 m, po procesie optymalizacji; s1–s18 – stanowiska pracy

Tabela 7.3. Wartości wskaźnika globalnego, Q_{GWA} (przed optymalizacją), Q_{GWA1} (po optymalizacji tylko położeń generatorów), Q_{GWA2} (po optymalizacji położeń tylko stanowisk pracy) i Q_{GWA3} (po optymalizacji położeń generatorów i stanowisk pracy) w punktach, w których są zlokalizowane stanowiska pracy – s1–s18

s1	Q_{GWA}	0,53	s7	Q_{GWA}	0,63	s13	Q_{GWA}	0,71
	Q_{GWA1}	0,53		Q_{GWA1}	0,54		Q_{GWA1}	0,59
	Q_{GWA2}	0,53		Q_{GWA2}	0,56		Q_{GWA2}	0,58
	Q_{GWA3}	0,55		Q_{GWA3}	0,54		Q_{GWA3}	0,55
s2	Q_{GWA}	0,53	s8	Q_{GWA}	0,66	s14	Q_{GWA}	0,73
	Q_{GWA1}	0,53		Q_{GWA1}	0,53		Q_{GWA1}	0,58
	Q_{GWA2}	0,53		Q_{GWA2}	0,53		Q_{GWA2}	0,53
	Q_{GWA3}	0,55		Q_{GWA3}	0,53		Q_{GWA3}	0,52
s3	Q_{GWA}	0,53	s9	Q_{GWA}	0,63	s15	Q_{GWA}	0,71
	Q_{GWA1}	0,53		Q_{GWA1}	0,54		Q_{GWA1}	0,56
	Q_{GWA2}	0,54		Q_{GWA2}	0,54		Q_{GWA2}	0,55
	Q_{GWA3}	0,53		Q_{GWA3}	0,53		Q_{GWA3}	0,55
s4	Q_{GWA}	0,58	s10	Q_{GWA}	0,68	s16	Q_{GWA}	0,64
	Q_{GWA1}	0,53		Q_{GWA1}	0,51		Q_{GWA1}	0,67
	Q_{GWA2}	0,50		Q_{GWA2}	0,55		Q_{GWA2}	0,53
	Q_{GWA3}	0,53		Q_{GWA3}	0,52		Q_{GWA3}	0,52
s5	Q_{GWA}	0,60	s11	Q_{GWA}	0,71	s17	Q_{GWA}	0,66
	Q_{GWA1}	0,53		Q_{GWA1}	0,51		Q_{GWA1}	0,67
	Q_{GWA2}	0,53		Q_{GWA2}	0,53		Q_{GWA2}	0,54
	Q_{GWA3}	0,52		Q_{GWA3}	0,53		Q_{GWA3}	0,53
s6	Q_{GWA}	0,58	s12	Q_{GWA}	0,69	s18	Q_{GWA}	0,64
	Q_{GWA1}	0,53		Q_{GWA1}	0,49		Q_{GWA1}	0,65
	Q_{GWA2}	0,53		Q_{GWA2}	0,54		Q_{GWA2}	0,54
	Q_{GWA3}	0,53		Q_{GWA3}	0,53		Q_{GWA3}	0,54

W wyniku pierwszej z przeprowadzonych optymalizacji, obejmującej jedynie lokalizację źródeł hałasu, uzyskano zmniejszenie wartości globalnego

wskaźnika jakości akustycznej na 12 stanowiskach pracy (tym samym ograniczono poziom hałasu na tych stanowiskach), dla trzech stanowisk wartość tego wskaźnika nie zmieniła się, a na pozostałych trzech stanowiskach wzrosła. Natomiast w wyniku optymalizacji jedynie lokalizacji stanowisk pracy mniejsze wartości wskaźnika Q_{GWA} osiągnięto na 15 stanowiskach pracy, na dwóch wartość wskaźnika była bez zmian, a na jednym wzrosła.

Wyniki ostatniej serii badań symulacyjnych – jednoczesnej optymalizacji lokalizacji źródeł hałasu i stanowisk pracy, wykazały zmniejszenie wartości wskaźnika Q_{GWA} na 15 stanowiskach pracy, przy czym wartości te są mniejsze od wartości uzyskanych w rezultacie optymalizacji jedynie lokalizacji stanowisk pracy. A zatem ten zakres optymalizacji spowodował największą poprawę komfortu akustycznego na stanowiskach pracy, jak również klimatu akustycznego w rozpatrywanym pomieszczeniu przemysłowym.

8
Podsumowanie

Głównym celem pracy było stworzenie definicji pojęcia jakości akustycznej maszyny, odzwierciedlającego w sposób obiektywny zagrożenie hałasem powodowane przez maszynę w warunkach jej eksploatacji. Ponadto zostały także sformułowane dwa, związane z celem głównym, cele szczegółowe:

- opracowanie nowego wskaźnika oceny akustycznej maszyny – globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny, służącego do liczbowego scharakteryzowania jakości akustycznej maszyny
- wykazanie, że jest możliwe wykorzystanie globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny zarówno do prognozowania hałasu w pomieszczeniach eksploatacyjnych maszyn, jak i do wspomagania właściwego rozmieszczenia maszyn oraz stanowisk pracy w tych pomieszczeniach ze względu na ograniczenie zawodowej ekspozycji na hałas.

Osiągnięcie celu głównego oraz celów szczegółowych wymagało zrealizowania prac badawczych obejmujących:

– analizy procesów projektowania i oceny maszyn w aspekcie emisji hałasu
– analizy wskaźnikowych metod oceny akustycznej maszyn i hal przemysłowych
– wykorzystanie metody inwersji do wyznaczania modeli zastępczych przemysłowych źródeł hałasu
– opracowanie definicji pojęcia „jakość akustyczna maszyny”
– opracowanie matematycznego opisu emisji hałasu maszyn za pomocą wskaźników cząstkowych, będących elementami składowymi globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny

- opracowanie programu do prognozowania emisji hałasu maszyn i do wspomagania optymalnej lokalizacji maszyn i stanowisk pracy w pomieszczeniach przemysłowych
- badania laboratoryjne, symulacyjne i weryfikujące.

Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, że ani w Polsce, ani na świecie nie prowadzi się badań jakości akustycznej wyrobów bez udziału grup słuchaczy oceniających emitowane dźwięki. W związku z tym jakość akustyczna wyrobu jest określana na podstawie informacji psychoakustycznych i zawiera zarówno składnik obiektywny, jak i subiektywny odbioru wrażeń słuchowych.

Znajduje to odzwierciedlenie w powszechnie przyjętej definicji jakości akustycznej wyrobu, mówiącej, że jest to: *zauważalna reakcja na dźwięk emitowany przez wyrób, która odzwierciedla reakcję słuchacza polegającą na akceptowalności dźwięku wyrobu. Przyjęto założenie, że im dźwięk jest bardziej akceptowalny, tym wyższa jest jakość akustyczna wyrobu*. Zatem jakość akustyczna jest określana przez reakcję człowieka na dźwięk, czyli postrzeganie wyrobu na podstawie jego brzmienia. Prowadzone na świecie prace w tym zakresie dotyczą takich wyrobów, jak pojazdy samochodowe, sprzęt gospodarstwa domowego, sprzęt komputerowy. Ich celem jest nie tylko określenie jakości akustycznej tych wyrobów, lecz także wyznaczenie korelacji między postrzeganiem brzmienia wyrobu przez wybraną grupę osób oceniających a parametrami charakteryzującymi emisję hałasu. Jednak wspomniane prace i badania nie dotyczą maszyn, które są najpowszechniejszym wyrobem stosowanym w procesach pracy.

Istotnym mankamentem oceny jakości akustycznej wyrobów jest nie tylko ograniczony zakres wyrobów, w stosunku do których jest stosowana, lecz występujące w tej ocenie składniki subiektywne, utrudniające uzyskanie powtarzalności i odtwarzalności badań. Ponadto wyniki oceny jakości akustycznej tych samych wyrobów różnią się w zależności od grup etnicznych i kulturowych, co wykazały przeprowadzone badania porównawcze.

Niezależnie od takiej (realizowanej w trybie dobrowolnym) oceny akustycznej, większość wyrobów podlega obowiązkowej ocenie zgodności z wymaganiami podstawowymi (określonymi w przepisach prawnych). W przypadku maszyn ocena ta jest prowadzona na etapie projektowania oraz produkcji i obejmuje między innymi ocenę akustyczną, której zasady wymagają jedynie

wyznaczenia i ewentualnie zadeklarowania danych charakteryzujących emisję hałasu – wartości poziomu ciśnienia akustycznego emisji i ewentualnie wartości poziomu mocy akustycznej. Brak ustalonych wartości dopuszczalnych tych wielkości powoduje, że każda maszyna może być wprowadzona na rynek bez względu na wielkość emitowanego hałasu (wyjątek stanowią maszyny stosowane na zewnątrz pomieszczeń). Ponadto, deklarowane przez producentów wartości charakteryzujące emisję hałasu maszyn nie dostarczają użytkownikom informacji na temat, jaki będzie klimat akustyczny w pomieszczeniu eksploatacyjnym po zainstalowaniu maszyny.

Uwzględniając powyższe uwarunkowania oraz biorąc pod uwagę różne etapy życia maszyny, opracowano oryginalną definicję pojęcia „jakość akustyczna maszyny", która brzmi następująco: **jakość akustyczna maszyny w warunkach eksploatacyjnych to zbiór cech maszyny oraz pomieszczenia eksploatacyjnego, wpływających na poziom hałasu oddziałującego na osoby w tym pomieszczeniu. Jakość akustyczna maszyny może być sparametryzowana i osiągać wartości wysokie, jeśli poziom ciśnienia akustycznego na stanowisku pracy nie przekracza wartości dopuszczalnych, lub niskie, jeśli stwierdzone jest przekroczenie wartości dopuszczalnych hałasu.**

Jakość akustyczną można kształtować za pomocą zespołu zaplanowanych i systematycznie realizowanych działań w fazach projektowania, produkcji, instalowania i eksploatacji maszyny, których celem jest zapewnienie emisji odpowiednio niskiego poziomu dźwięku, niepowodującego zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy w pomieszczeniu eksploatacyjnym.

Przyjęta definicja wprowadza nowy wymiar jakości związanej z maszyną i obejmuje w sposób bezpośredni wszystkie etapy życia maszyny z wyjątkiem etapu likwidacji. Jednak ten ostatni etap został uwzględniony w sposób pośredni na poziomie ekoprojektowania akustycznego. Środkami umożliwiającymi zapewnienie jakości akustycznej maszyny są nie tylko standardowe zasady związane z wdrożeniem systemu zarządzania jakością na etapach jej projektowania i produkcji oraz podczas badań i oceny akustycznej. Istotnym środkiem przyczyniającym się do zapewniania wysokiego poziomu jakości akustycznej maszyny są zaproponowane przez autora dobre praktyki akustyczne w procesie projektowania maszyn o ograniczonym hałasie. Praktyki te polegają na uwzględnieniu w procesie projektowania zasad zrównoważonego rozwoju, jak

również celu tego rozwoju, jakim jest odpowiednia jakość życia ludzi (a więc życia na odpowiednim poziomie społecznym, w rozwiniętym środowisku, także przemysłowym, i jednocześnie w zgodzie z przyrodą).

Dostosowanie procesu projektowania maszyn do osiągnięcia celu, jakim jest rozwój zrównoważony, wymaga, by zostały spełnione zasady prośrodowiskowego projektowania maszyn, tzw. ekoprojektowania. Spełnienie tych wymagań zapewnia realizacja zasady 3R (ang. reduce, reuse, recycle). W związku z tym opracowane przez autora dobre praktyki akustyczne w procesie projektowania maszyn zostały ujęte w formie procedury obejmującej cztery fazy, w których następuje uściślenie zadań projektowych ze szczególnym uwzględnieniem metod redukcji hałasu oraz zasady 3R, polegającej między innymi na doborze materiałów pod kątem minimalizacji obciążenia środowiska w następstwie ich degradacji czy też uwzględnieniu możliwości powtórnego użycia materiałów po zakończeniu eksploatacji maszyny, z czym wiąże się konieczność zapewnienia środowiskowego bezpieczeństwa procesu demontażu maszyny.

Natomiast na etapach instalowania i eksploatacji maszyny w celu zapewnienia jej jakości akustycznej konieczne jest przestrzeganie zasad określonych w dokumentacji techniczno-ruchowej (lub instrukcji użytkowania), a także uwzględnianie parametrów akustycznych pomieszczenia oraz lokalizacji pozostałych maszyn i innych źródeł hałasu znajdujących się w tym pomieszczeniu.

Ze względu na złożone mechanizmy generacji i propagacji dźwięku w maszynach, na określonych etapach projektowania jest wskazane sporządzanie prostych modeli akustycznych. Modele te stanowią podstawę uwzględniania środków redukcji hałasu i mogą wykorzystywać między innymi elementarne źródła dźwięku w formie monopoli. Jedną z metod umożliwiających wyznaczenie parametrów zastępczego modelu akustycznego maszyny jest metoda inwersji. W tej metodzie, modelując proces promieniowania energii wibroakustycznej przez źródło do odbiorcy oraz znając rzeczywistą wartość ciśnienia akustycznego w punktach pomiarowych, można odwrócić drogi propagacji i w ten sposób wyznaczyć parametry źródła dźwięku. W pracach własnych autora, w których od ponad 10 lat wykorzystywana jest metoda inwersji nie tylko do modelowania akustycznego maszyn, lecz także do wyznaczania wartości charakteryzujących emisję hałasu maszyn (tj. wartości poziomu ciśnienia akustycznego emisji i poziomu mocy akustycznej), przyjęto, że badaną maszynę zastępuje się zespołem

źródeł wszechkierunkowych o lokalizacjach pokrywających się z elementami funkcjonalnymi maszyny. W pracy przedstawiono przykładowe wyniki modelowania akustycznego odkurzacza przemysłowego – optymalne parametry (moce akustyczne) czterech zastępczych źródeł wszechkierunkowych. Lokalizacje tych źródeł zastępczych pokrywały się z następującymi elementami odkurzacza: turbiną, układem ssania, bokiem lewym i bokiem prawym. Sumaryczny poziom mocy akustycznej źródeł zastępczych (uwzględniający moce wzajemne pomiędzy poszczególnymi źródłami zastępczymi) – poziom mocy akustycznej A, był tylko o 0,2 dB większy od poziomu mocy akustycznej tego odkurzacza wyznaczonego metodą znormalizowaną.

Opracowane przez autora wskaźniki, umożliwiające zarówno ocenę akustyczną maszyn (wskaźnik energetyczny, wskaźnik emisyjny), jak i analizę procesów wibroakustycznych zachodzących w maszynach (wskaźnik promieniowania energii, wskaźnik przeniesienia energii), oraz uzyskane wyniki badań eksperymentalnych dotyczących kilku rodzajów maszyn były podstawą do osiągnięcia pierwszego z celów szczegółowych pracy, czyli opracowania wskaźnika umożliwiającego liczbowe scharakteryzowanie jakości akustycznej maszyny w warunkach eksploatacyjnych, który nazwano globalnym wskaźnikiem jakości akustycznej maszyny. Wskaźnik ten jest miarą jakości akustycznej maszyny i uwzględnia zależności między poziomem hałasu na stanowiskach pracy a wybranymi parametrami charakteryzującymi między innymi pomieszczenie eksploatacyjne. Zakładając, że za pomocą tego wskaźnika można nie tylko w sposób ilościowy określić jakość akustyczną maszyny, lecz także wykorzystać go do prognozowania hałasu w pomieszczeniach eksploatacyjnych maszyn oraz optymalnego, ze względu na ograniczenie zawodowej ekspozycji na hałas, rozmieszczenia maszyn i stanowisk pracy w pomieszczeniach eksploatacyjnych, opracowano opis matematyczny emisji hałasu maszyny za pomocą następujących wskaźników cząstkowych:

- wskaźnika mocy akustycznej
- wskaźnika odległości stanowiska pracy od maszyny
- wskaźnika kierunkowości promieniowania
- wskaźnika hałasu impulsowego i uderzeniowego
- wskaźnika rozkładu widma.

Każdy ze wskaźników cząstkowych może przybierać wartość z przedziału od 0 do 1 lub powyżej 1. Z kolei iloczyn wymienionych wskaźników określa wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny. Założono, że jeśli wartość dowolnego z tych wskaźników jest większa od 1, to dany parametr niekorzystnie wpływa na klimat akustyczny w środowisku pracy i zaleca się podjęcie stosownych działań w celu zmniejszenia jego wartości. Natomiast wartość mniejsza lub równa 1 oznacza, że dany parametr pozytywnie wpływa na warunki akustyczne – poprawia klimat akustyczny na stanowisku pracy. Następstwem tych założeń jest następująca zasada: jeżeli wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny jest mniejsza lub równa 1, maszynę można uważać za bezpieczną akustycznie, w przeciwnym przypadku, gdy wartość globalnego wskaźnika jest większa od 1, to hałas emitowany przez maszynę będzie przekraczał wartości dopuszczalne skorygowanego poziomu dźwięku A na stanowisku pracy. Zainstalowanie takiej maszyny w hali przemysłowej może być uciążliwe także dla pracowników, którzy nie są bezpośrednio związani z jej obsługą, oraz spowoduje pogorszenie klimatu akustycznego w tej hali.

Każdy ze wskaźników cząstkowych został opisany stosowną zależnością matematyczną, jak również scharakteryzowano metody wyznaczania ich wartości. Niezbędnymi danymi do wyznaczania tych wartości są między innymi poziom mocy akustycznej oraz poziom ciśnienia akustycznego emisji, które podczas badań eksperymentalnych zestawu czterech generatorów prądotwórczych zostały określone z zastosowaniem metody inwersji. Celem tych badań doświadczalnych, jak również zrealizowanych badań symulacyjnych, było zweryfikowanie globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny. Dla każdego z generatorów, pracującego w czterech różnych trybach i zainstalowanego w pomieszczeniu eksploatacyjnym, wyznaczono wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej oraz zmierzono poziom dźwięku A na stanowiskach pracy. Zmierzone wartości poziomu dźwięku A potwierdziły prawidłowość oceny prowadzonej z wykorzystaniem globalnego wskaźnika jakości akustycznej. W przypadku stanowisk pracy, dla których obliczone wartości wskaźnika były mniejsze od 1, zmierzone poziomy dźwięku A nie przekraczały wartości dopuszczalnej, tj. 85 dB. Jednocześnie, gdy wartości wskaźnika były większe od 1, wówczas zmierzone poziomy dźwięku A były większe od wartości dopusz-

czalnej (tj. od 85 dB). Wyniki te i zachodzące między nimi zależności potwierdziły prawidłowość opracowanego globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny. Potwierdzają to także wyniki badań symulacyjnych wskaźników cząstkowych i wskaźnika globalnego – uzyskane zależności funkcyjne wartości tych wskaźników od badanych parametrów były zgodne z oczekiwaniami wynikającymi z teorii fal akustycznych.

Istotny element pracy stanowi program komputerowy służący zarówno do prognozowania emisji hałasu maszyn, jak i do wspomagania optymalnej lokalizacji maszyn i stanowisk pracy w pomieszczeniach przemysłowych. Program ten jest przykładem innowacyjnego rozwiązania środka wspomagającego działania mające na celu ograniczanie narażenia na hałas. Wykorzystuje on algorytm genetyczny do przeszukiwania przestrzeni alternatywnych rozwiązań w celu wyszukania rozwiązań najlepszych, tj. optymalnych lokalizacji maszyn i stanowisk pracy w pomieszczeniu eksploatacyjnym ze względu na minimalizację zagrożenia hałasem oraz poprawę klimatu akustycznego w pomieszczeniu. W algorytmie tym przyjęto, że funkcja celu, umożliwiająca ocenę jakościową rozwiązań, jest zdefiniowana w postaci iloczynu globalnych wskaźników jakości akustycznej wszystkich maszyn znajdujących się w pomieszczeniu eksploatacyjnym.

Opracowane oprogramowanie umożliwia:

- wyznaczanie rozkładów globalnego wskaźnika jakości akustycznej w wybranych przekrojach obszarów ograniczonych o kształcie prostopadłościennym, stanowiącym typowy kształt hali przemysłowej, z zastosowaniem statystycznej metody prognozowania poziomu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniach
- wizualizacje graficzne dające możliwość niezależnej oceny wskaźników cząstkowych wpływających na wartość globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny
- optymalizację lokalizacji maszyn i stanowisk pracy pod kątem minimalizacji szkodliwego oddziaływania hałasu na pracowników za pomocą algorytmu genetycznego wykorzystującego do obliczania funkcji przystosowania pojęcie globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny

- prowadzenie badań weryfikacyjnych wskaźnika jakości akustycznej poprzez możliwość wprowadzania rzeczywistych danych modeli akustycznych składających się z maszyn i urządzeń oraz parametrów pomieszczenia przemysłowego
- prowadzenie badań weryfikacyjnych wskaźnika jakości akustycznej poprzez modyfikacje parametrów wpływających na przebieg wartości i zakresy zmienności wskaźników cząstkowych globalnego wskaźnika jakości akustycznej.

Za pomocą tego oprogramowania, z wykorzystaniem analizy rozkładu pola akustycznego metodą statystyczną, wyznaczono wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej badanych generatorów oraz rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego w różnych przekrojach pomieszczenia. Na podstawie porównania wyników uzyskanych za pomocą oprogramowania i wyników pomiarów poziomów ciśnienia akustycznego dla różnych konfiguracji badanych generatorów prądotwórczych stwierdzono, że w zdecydowanej większości przypadków różnice między prognozowanymi poziomami ciśnienia akustycznego a rzeczywistymi wartościami nie przekraczają 0,5 dB (największa różnica wynosiła 1,6 dB).

Przeprowadzone badania symulacyjne nad optymalizacją lokalizacji maszyn i stanowisk pracy wykazały, że przyjęcie jako funkcji celu uzyskania minimalnej wartości iloczynu globalnych wskaźników jakości jest prawidłowe. Badania te były ukierunkowane na minimalizację hałasu na stanowiskach pracy oraz poprawę klimatu akustycznego. W ramach badań dokonano:

- optymalizacji lokalizacji dwóch generatorów w pomieszczeniu
- optymalizacji lokalizacji osiemnastu stanowisk pracy w pomieszczeniu
- optymalizacji jednoczesnej lokalizacji dwóch generatorów i osiemnastu stanowisk pracy w pomieszczeniu przemysłowym.

Najlepsze rezultaty, to znaczy najmniejsze wartości globalnego wskaźnika jakości akustycznej maszyny, a tym samym ograniczenie narażenia na hałas i poprawę klimatu akustycznego, uzyskano w przypadku jednoczesnej optymalizacji lokalizacji maszyn i położeń stanowisk pracy.

Zaproponowane przez autora pojęcie jakości akustycznej maszyny oraz charakteryzujący maszynę globalny wskaźnik jakości akustycznej, a także opracowane oprogramowanie do prognozowania hałasu i optymalnego (ze

względu na ograniczenie zawodowej ekspozycji na hałas) rozmieszczania maszyn i stanowisk pracy w pomieszczeniach eksploatacyjnych są szczególnie przydatne w przypadku maszyn produkowanych jednostkowo – na indywidualne zamówienie. Stanowią one wówczas istotne wsparcie dla współpracy między producentem a użytkownikiem w realizacji zadań projektowych, produkcyjnych oraz związanych z zainstalowaniem i eksploatacją maszyny, przez co można uniknąć przekroczenia wartości dopuszczalnej poziomu hałasu na stanowisku pracy w pomieszczeniu eksploatacyjnym. Mogą być także wykorzystane odnośnie do maszyn produkowanych seryjnie. W tym przypadku szczególnie wspomagają użytkownika, zarówno w procesie wyboru maszyny, dla której poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu eksploatacyjnym nie przekroczy wartości dopuszczalnej, jak i w procesie określania miejsca jej zainstalowania w pomieszczeniu.

Opracowane wskaźniki służą do sporządzania obiektywnych ocen środowiska pracy człowieka i do osiągnięcia poprawy jakości życia. Otrzymane wyniki, w tym zdefiniowanie pojęcia jakości akustycznej maszyny oraz związanego z nią globalnego wskaźnika jakości akustycznej, wnoszą zarówno nowe możliwości w zakresie kształtowania środowiska pracy, jak i wspierają priorytetowe zadania dotyczące ograniczenia emisji hałasu maszyn oraz zmniejszenia ryzyka wynikającego z narażenia na hałas.

Załączniki

Załącznik 1

Regulacje prawne dotyczące oceny zgodności maszyn

Z.1. System oceny zgodności wyrobów w Unii Europejskiej

Z.1.1. Założenia systemu oceny zgodności

W państwach Unii Europejskiej podstawowe uregulowania prawne dotyczące oceny zgodności wyrobów, w tym także dotyczące oceny emisji hałasu maszyn i urządzeń, zawarte są w dyrektywach oraz normach europejskich, które zostaną wymienione w dalszej części niniejszego załącznika. Znaczący rozwój tej tematyki nastąpił po wydaniu rezolucji Rady Wspólnot Europejskich z dnia 7 maja 1985 r., dotyczącej nowego podejścia do technicznej harmonizacji i normalizacji (tzw. nowe podejście do badań i certyfikacji) [145]. W rezolucji zostały sformułowane następujące założenia systemu oceny zgodności wyrobów w państwach Unii Europejskiej:

- w celu zapewnienia swobodnego przepływu towarów i jednoczesnego zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia ludzi oraz ochrony środowiska, harmonizacja przepisów prawnych w państwach członkowskich Unii Europejskiej będzie ograniczona tylko do wyrobów wpływających na bezpieczeństwo i zdrowie ludzi oraz środowisko naturalne
- harmonizacja tych przepisów będzie realizowana przez adaptację przez państwa członkowskie obligatoryjnych postanowień dyrektyw harmonizacji technicznej, zawierających podstawowe wymagania bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w odniesieniu do wyrobów mogących mieć wpływ na bezpieczeństwo i zdrowie ludzi oraz środowisko naturalne
- w celu zapewnienia zgodności wyrobów z podstawowymi wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia określonymi w odpowiednich dyrektywach harmonizacji technicznej będą stosowane zharmonizowane normy europejskie, zawierające szczegółowe wymagania

techniczne precyzujące wymagania podstawowe tych dyrektyw
- zharmonizowane normy europejskie będą ustanawiane przez komitety normalizacyjne CEN (Europejski Komitet Normalizacyjny), CENELEC (Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki) oraz ETSI (Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych) i będą miały status norm nieobligatoryjnych
- założono, że wyroby, które spełnią wymagania zawarte w zharmonizowanych normach europejskich, spełnią tym samym podstawowe wymagania bezpieczeństwa i ochrony zdrowia określone w dyrektywach harmonizacji technicznej.

W związku z tymi ustaleniami, w lutym 1986 r. państwa członkowskie przyjęły *Jednolity akt europejski* [161], wprowadzający do *Traktatu rzymskiego* [162] artykuł 100a zobowiązujący Komisję Europejską do wydawania dyrektyw harmonizacji technicznej (zwanych także dyrektywami nowego podejścia). Celem tych dyrektyw było utworzenie i zapewnienie sprawnego funkcjonowania jednolitego rynku wewnętrznego na całym obszarze Unii Europejskiej, z jednoczesnym zapewnieniem wysokiego poziomu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia konsumentów i użytkowników wyrobów stosowanych w państwach Unii Europejskiej.

Wprowadzenie w życie zasad nowego podejścia wiązało się z koniecznością zdefiniowania warunków do wzajemnego uznawania wyników oceny zgodności wyrobów, w tym opracowania ogólnych ram dla procedur oceny zgodności. Stało się to możliwe w ramach tzw. globalnego podejścia do oceny zgodności. Podstawowe zasady globalnego podejścia zostały sformułowane w uchwale przyjętej przez Radę Wspólnot Europejskich w dniu 21 grudnia 1989 r., dotyczącej globalnego podejścia do oceny zgodności i wspólnych zasad oznaczania znakiem CE [146]. Jednak niezbędnym warunkiem wdrożenia zasad globalnego podejścia okazało się ustanowienie nowych aktów uzupełniających, takich jak decyzja Rady nr 93/465/EWG z 22 lipca 1993 r. [143], w której określono moduły przeznaczone do stosowania w różnych fazach procedur oceny zgodności wyrobów.

Nowe podejście opiera się na zasadzie, że producent lub importer wprowadza do obrotu wyroby na własną odpowiedzialność. Spełnienie wymagań przez wyroby wprowadzone do obrotu potwierdzają certyfikaty zgodności wy-

stawiane przez jednostki notyfikowane albo deklaracje zgodności samego producenta.

W 2006 r. Komisja Europejska przeprowadziła konsultacje związane z reformą nowego podejścia, które potwierdziły potrzebę dokonania konsolidacji zasad i podstaw prawnych w celu zharmonizowania przepisów dotyczących wyrobów wprowadzonych na rynek wewnętrzny. W rezultacie tych działań zostały opracowane i opublikowane nowe regulacje horyzontalne, między innymi:

- rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 765/2008 z dnia 9 lipca 2008 r., ustanawiające wymagania w zakresie akredytacji i nadzoru rynku odnoszącego się do warunków wprowadzania produktów do obrotu [160]
- decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady nr 768/2008/WE z dnia 9 lipca 2008 r. w sprawie wspólnych ram dotyczących wprowadzania do obrotu [147], uchylająca jednocześnie decyzję Rady 93/465/EWG [143].

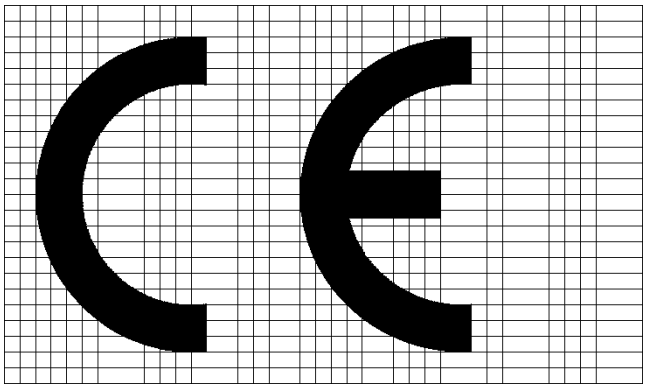
Drugi z wymienionych dokumentów, zastępując wcześniej wspomnianą decyzję 93/465/EWG, wprowadził nowe moduły przeznaczone do stosowania w różnych fazach procedur oceny zgodności, które scharakteryzowano w podrozdziale Z.1.2.

Na mocy decyzji Parlamentu Europejskiego i Rady nr 768/2008/WE z dnia 9 lipca 2008 r. [147] zmodyfikowaniu uległ system modułowy składający się z określonej liczby modułów przeznaczonych do stosowania w różnych fazach procedur oceny zgodności. Czynnikami różnicującymi moduły są:

- faza powstawania, w jakiej znajduje się dany wyrób (projektowanie, produkcja)
- sposób przeprowadzenia oceny (np. sprawdzenie dokumentacji, zatwierdzenie typu)
- podmiot przeprowadzający ocenę (producent lub trzecia strona).

Dyrektywy harmonizacji technicznej, ogłoszone w ramach nowego podejścia, mogą zatem definiować wprowadzane procedury oceny zgodności poprzez odniesienie ich do jednego lub kilku (kombinacji) modułów (podrozdział Z.1.2).

Końcowym działaniem w ramach procedur oceny zgodności jest oznaczenie wyrobów przez producenta znakiem CE (rys. Z-1), a zasady stosowania tego znaku zostały ujednolicone w dyrektywie 93/68/EWG [144] oraz w rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 765/2008 [160]. Znak ten oznacza, że dany wyrób spełnia wymagania wszystkich dyrektyw harmonizacji technicznej dotyczących tego wyrobu.



Rys. Z-1. Wzór graficzny znaku CE [160]

Podstawowe uregulowania prawne Unii Europejskiej dotyczące oceny zgodności wyrobów są zawarte w następujących dokumentach:

- obligatoryjnych dyrektywach harmonizacji technicznej (tzw. dyrektywach nowego podejścia) zawierających podstawowe wymagania bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w stosunku do wyrobów mogących mieć wpływ na bezpieczeństwo i zdrowie ludzi oraz środowisko naturalne
- zharmonizowanych normach europejskich, zawierających szczegółowe wymagania techniczne precyzujące wymagania podstawowe dyrektyw.

W odniesieniu do maszyn podstawowe wymagania w dziedzinie bezpieczeństwa i zdrowia użytkowników (obejmujące także wymagania dotyczące emisji hałasu), jak również zasady oceny zgodności i wprowadzania na rynek zostały określone w dyrektywie 98/37/WE [151] dotyczącej maszyn (w Polsce dyrektywa ta została wdrożona w drodze rozporządzenia ministra gospodarki, pracy i polityki społecznej z dnia 10 kwietnia 2003 r. w sprawie zasadniczych

wymagań dla maszyn i elementów bezpieczeństwa, zastąpionego następnie rozporządzeniem ministra gospodarki z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn i elementów bezpieczeństwa) [155]. Z dniem 29 grudnia 2009 r. weszły w życie przepisy nowej, zastępującej dyrektywę 98/37/WE, dyrektywy 2006/42/WE z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn, zmieniającej dyrektywę 95/16/WE (przekształcenie) [150]. W Polsce dyrektywa 2006/42/WE została wprowadzona do prawa krajowego na mocy rozporządzenia ministra gospodarki z dnia 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn [157] (rozporządzenie to weszło w życie z dniem 29 grudnia 2009 r.).

Wymagania z zakresu hałasu zawarte w dyrektywie maszynowej, odnoszące się do konstruktora (producenta) maszyn, można streścić w następujący sposób:

- podać w dokumentacji technicznej i w instrukcji obsługi maszyn informację na temat hałasu, określoną na podstawie pomiarów
- zredukować emitowany hałas na etapie projektowania maszyny
- wskazać środki techniczne redukowania zagrożeń związanych ze stosowaniem maszyny (wymaganie wspólne dla wszystkich zagrożeń).

W dyrektywie maszynowej nie ustala się poziomów granicznych emisji hałasu. Jej cel jest całkowicie inny. Chodzi o to, aby konstruktorzy:

- postępowali tak, by wartości emisji hałasu maszyn wprowadzanych na rynek były znane, dostępne i porównywalne, co umożliwi użytkownikowi w ramach relacji klient/dostawca uwzględnić przy zakupie maszyny kryterium mniejszego hałasu
- redukowali hałas u źródła, począwszy od etapu projektowania.

W zakresie informacji na temat emitowanego hałasu, dyrektywa maszynowa jest bardzo precyzyjna, w szczególności w odniesieniu do fizycznych wielkości emisji hałasu, które należy mierzyć i których wartość należy podać. To działanie informacyjne, wymagane od konstruktorów, często jest kwalifikowane jako „deklaracja hałasu".

Do oceny akustycznej maszyn, oprócz omówionej wcześniej dyrektywy, odnosi się jeszcze istotna dyrektywa 2000/14/WE dotycząca urządzeń używanych na zewnątrz pomieszczeń w zakresie emisji hałasu [148] (zmieniona dyrektywą 2005/88/WE [152]). Dyrektywa 2000/14/WE (wdrożona w Polsce

w drodze rozporządzenia ministra gospodarki, pracy i polityki społecznej z dnia 2 lipca 2003 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń używanych na zewnątrz pomieszczeń w zakresie emisji hałasu do środowiska, zastąpionego następnie rozporządzeniem ministra gospodarki z dnia 21 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń używanych na zewnątrz pomieszczeń w zakresie emisji hałasu do środowiska [156], które było zmienione rozporządzeniami ministra gospodarki z dnia 15 lutego 2006 r. [154] oraz z dnia 28 maja 2007 r. [158]), należy do grupy tzw. dyrektyw opierających się na nowym i globalnym podejściu. W rozdz. Z.2 przybliżono dyrektywę maszynową i dyrektywę hałasową oraz zamieszczono informację na temat norm zharmonizowanych z dyrektywą maszynową.

Z.1.2. Moduły oceny zgodności

Moduły oceny zgodności ustanowione w decyzji Parlamentu Europejskiego i Rady nr 768/2008/WE [147] (tab. Z-1) oznaczono literami od A do H, przy czym moduły A, G i H są pełnymi procedurami oceny zgodności (obejmują etapy projektowania i produkcji wyrobu). Natomiast moduł B (mający zastosowanie jedynie na etapie projektowania wyrobu) w celu utworzenia pełnej procedury oceny zgodności trzeba połączyć z jednym z modułów stosowanych tylko na etapie produkcji wyrobu (C, D, E lub F).

Zawsze, gdy procedury oceny zgodności wymagają udziału trzeciej strony, stroną tą są jednostki notyfikowane, czyli jednostki kompetentne pod względem technicznym i organizacyjnym do wykonywania określonych zadań oraz zgłoszone (notyfikowane) w tym celu przez państwa członkowskie do Komisji Europejskiej. Zadania tych jednostek są różne w poszczególnych modułach procedur oceny zgodności wyrobów. Dalej scharakteryzowano procedury oceny zgodności oparte na ustanowionych modułach.

Tabela Z-1. Moduły procedur oceny zgodności wyrobów stosowane w dyrektywach harmonizacji technicznej [147]

PROJEKTOWANIE

A. Wewnętrzna kontrola produkcji	**B. Badanie typu**	**G. Weryfikacja jednostkowa**	**H. Pełne zapewnienie jakości**
Producent: – przechowuje dokumentację techniczną do wglądu władz krajowych	Producent dostarcza jednostce notyfikowanej: – dokumentację techniczną – dowody potwierdzające adekwatność technicznego rozwiązania projektowego – wymagane próbki, reprezentatywne dla przewidywalnej produkcji Jednostka notyfikowana: – stwierdza zgodność z zasadniczymi wymaganiami – bada dokumentację techniczną i dowody potwierdzające w celu oceny adekwatności projektu technicznego – w odniesieniu do próbki (próbek): w stosownym przypadku przeprowadza badania – wydaje certyfikat badania typu WE	Producent: – dostarcza dokumentację techniczną	EN ISO 9001:2008 Producent: – stosuje zatwierdzony system jakości dla projektowania – dostarcza dokumentację techniczną Jednostka notyfikowana: – sprawuje nadzór nad systemem jakości **H1.** Jednostka notyfikowana: – weryfikuje zgodność projektu – wydaje certyfikat badania projektu

PRODUKCJA

A. Producent: – deklaruje zgodność z zasadniczymi wymaganiami – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności	**C.** **Zgodność z typem** Producent: – deklaruje zgodność z zatwierdzonym typem – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności	**D.** **Zapewnienie jakości produkcji** EN ISO 9001:2008 Producent: – stosuje zatwierdzony system jakości dla produkcji oraz końcowej inspekcji i badań – deklaruje zgodność z zatwierdzonym typem – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności	**E.** **Zapewnienie jakości produktu** EN ISO 9001:2008 Producent: – stosuje zatwierdzony system jakości dla końcowej inspekcji i badań – deklaruje zgodność z zatwierdzonym typem – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności	**F.** **Weryfikacja produktu** Producent: – deklaruje zgodność z zatwierdzonym typem – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności	Producent: – dostarcza produkt – deklaruje zgodność – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności	Producent: – stosuje zatwierdzony system jakości dla produkcji, końcowej inspekcji i badań – deklaruje zgodność – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności
A1. Akredytowana jednostka własna lub jednostka notyfikowana: – badania specyficznych aspektów produktu	**C1.** Akredytowana jednostka własna lub jednostka notyfikowana: – badania specyficznych aspektów produkcji	**D1.** deklaruje zgodność z zasadniczymi wymaganiami – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności	**E1.** deklaruje zgodność z zasadniczymi wymaganiami – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności	**F1.** deklaruje zgodność z zasadniczymi wymaganiami – umieszcza wymagane oznakowanie zgodności		
A2. – kontrola produktów w przypadkowych odstępach czasu	**C2.** – kontrola produktów w przypadkowych odstępach czasu	Jednostka notyfikowana: – zatwierdza system jakości – sprawuje nadzór nad systemem jakości	Jednostka notyfikowana: – zatwierdza system jakości – sprawuje nadzór nad systemem jakości	Jednostka notyfikowana: – weryfikuje zgodność z zasadniczymi wymaganiami – wydaje certyfikat zgodności	Jednostka notyfikowana: – weryfikuje zgodność z zasadniczymi wymaganiami – wydaje certyfikat zgodności	Jednostka notyfikowana: – sprawuje nadzór nad systemem jakości

Procedura A. Wewnętrzna kontrola produkcji

W tej procedurze, zarówno na etapie projektowania jak i produkcji, stosuje się moduł A (wewnętrzna kontrola produkcji). Na etapie projektowania producent sporządza i gromadzi dokumentację techniczną wyrobu, która umożliwia ustalenie zgodności tego wyrobu z zasadniczymi wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. Następnie, na etapie produkcji, producent zapewnia odpowiednie środki niezbędne do tego, aby proces produkcji gwarantował zgodność produkowanych wyrobów z wymaganiami zasadniczymi, oraz wydaje odpowiednią deklarację zgodności danych wyrobów z tymi wymaganiami. W tej procedurze nie bierze udziału strona trzecia (jednostka notyfikowana).

Procedura A1. Wewnętrzna kontrola produkcji oraz badanie produktów pod nadzorem

Procedura ta składa się z modułu A uzupełnionego o zaangażowanie na etapie produkcji akredytowanej jednostki własnej lub odpowiedniej jednostki notyfikowanej do wykonywania badań jednej lub kilku specyficznych cech każdego wyrobu.

Procedura A2. Wewnętrzna kontrola produkcji oraz nadzorowana kontrola produktów w przypadkowych odstępach czasu

Procedura ta składa się z modułu A uzupełnionego o zaangażowanie na etapie produkcji akredytowanej jednostki własnej lub jednostki notyfikowanej w celu weryfikacji jakości wewnętrznej kontroli produktu. Zależnie od wyboru producenta, akredytowana jednostka własna lub jednostka notyfikowana wybrana przez producenta przeprowadza bądź zleca przeprowadzanie kontroli produktu w przypadkowych odstępach czasu określonych przez jednostkę, z uwzględnieniem m.in. złożoności technicznej produktów oraz skali produkcji. W celu kontroli zgodności produktu z odpowiednimi wymaganiami aktu prawnego bada się odpowiednią próbkę gotowych produktów, pobraną przez taką jednostkę na miejscu przed wprowadzeniem produktów do obrotu, oraz przeprowadza odpowiednie badania określone w odnośnych częściach normy zharmonizowanej lub specyfikacji technicznych bądź badania równoważne.

Procedura B+C. Badanie typu WE oraz zgodności z typem na podstawie wewnętrznej kontroli produkcji

W tej procedurze na etapie projektowania wykorzystuje się moduł B (badanie typu), a na etapie produkcji – moduł C (zgodność z typem). Zgodnie z zasadami modułu B, już na etapie projektowania producent przedstawia egzemplarz wyrobu i towarzyszącą mu dokumentację techniczną do oceny jednostce notyfikowanej, która ocenia zgodność egzemplarza z wymaganiami zasadniczymi oraz wystawia certyfikat zatwierdzenia typu. Na tej podstawie producent na etapie produkcji zapewnia odpowiednie środki umożliwiające produkowanie wyrobów zgodnych z typem określonym w certyfikacie zatwierdzenia oraz z odnoszącymi się do niego wymaganiami dyrektywy, a także wydaje odpowiednią deklarację zgodności tych wyrobów z zatwierdzonym typem. W pewnych przypadkach na etapie produkcji może nastąpić zaangażowanie akredytowanej jednostki własnej lub jednostki notyfikowanej do wykonywania badań specyficznych cech wyrobu lub do wykonywania badań określonych cech wyrobu, w przypadkowych odstępach czasu.

Procedura B+D. Badanie typu WE oraz zgodność z typem na podstawie zapewnienia jakości produkcji

W tej procedurze na etapie projektowania wykorzystuje się moduł B (badanie typu), a na etapie produkcji – moduł D (zapewnienie jakości produkcji). Postępowanie na etapie projektowania jest takie samo jak w procedurze B+C. Na etapie produkcji producent zapewnia zgodność produkowanych wyrobów z zatwierdzonym typem i z dotyczącymi go wymaganiami dyrektywy, przez utrzymywanie systemu zapewnienia jakości produkcji. Na tej podstawie wydaje odpowiednią deklarację zgodności tych wyrobów z zatwierdzonym typem. Stosowna jednostka notyfikowana ocenia, zatwierdza (certyfikuje) i nadzoruje system zapewnienia jakości produkcji. Dodatkowo jednostka notyfikowana może nadzorować dokumentację techniczną wyrobu (moduł D1: Zapewnienie jakości produkcji).

Procedura B+E. Badanie typu WE oraz zgodność z typem na podstawie zapewnienia jakości produktu

W tej procedurze na etapie projektowania stosuje się moduł B (badanie typu), a na etapie produkcji – moduł E (zapewnienie jakości wyrobu). Postępowanie na etapie projektowania jest takie samo jak w procedurze B+C. Na etapie produkcji producent zapewnia zgodność produkowanych wyrobów z zatwierdzonym typem i z dotyczącymi go wymaganiami dyrektywy, przez utrzymywanie systemu zapewnienia jakości podczas badań końcowych wyrobów. Na tej podstawie wydaje odpowiednią deklarację zgodności tych wyrobów z zatwierdzonym typem lub z wymaganiami zasadniczymi. Stosowna jednostka notyfikowana ocenia, zatwierdza (certyfikuje) i nadzoruje system zapewnienia jakości wyrobów.

Procedura B+F. Badanie typu WE oraz zgodność z typem na podstawie weryfikacji produktu

W tej procedurze na etapie projektowania wykorzystuje się moduł B (badanie typu), a na etapie produkcji – moduł F (weryfikacja produktu). Postępowanie na etapie projektowania jest takie samo jak w procedurze B+C. Na etapie produkcji producent zapewnia odpowiednie środki umożliwiające produkowanie wyrobów identycznych z zatwierdzonym typem lub z wymaganiami zasadniczymi. Alternatywnie dopuszcza się przypadek, że na etapie produkcji producent podejmuje niezbędne środki (z wykorzystaniem pełnej dokumentacji technicznej wyrobu), aby proces produkcji i jego monitorowanie zapewniały zgodność wytworzonych wyrobów z odnośnymi wymaganiami aktu prawnego (moduł F1: zgodność na podstawie weryfikacji produktu). Stosowna jednostka notyfikowana sprawdza (weryfikuje) zgodność produkowanych wyrobów z zatwierdzonym typem lub z wymaganiami zasadniczymi, przez badanie każdego egzemplarza wyrobu lub badanie próbek wyrobu pobieranych zgodnie z metodami statystycznymi.

Procedura G. Zgodność na podstawie weryfikacji jednostkowej

Procedura ta, zarówno na etapie projektowania jak i produkcji, opiera się na module G (weryfikacja jednostkowa wyrobu) i jest stosowana głównie przy jednostkowej produkcji wyrobów (np. na indywidualne zamówienie). Na etapie

produkcji producent gromadzi pełną dokumentację techniczną wyrobu, która umożliwia ustalenie zgodności tego wyrobu z zasadniczymi wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. Na etapie produkcji producent zapewnia odpowiednie środki umożliwiające wykonanie wyrobu zgodnie z wymaganiami zasadniczymi oraz przedstawia wyrób wraz z dokumentacją odpowiedniej jednostce notyfikowanej, która ocenia zgodność wyrobu i jego dokumentacji z wymaganiami zasadniczymi i wystawia certyfikat zgodności. Na jego podstawie producent wydaje odpowiednią deklarację zgodności wyrobu z tymi wymaganiami.

Procedura H. Zgodność oparta na pełnym zapewnieniu jakości

W tej procedurze wykorzystuje się, zarówno na etapie projektowania jak i produkcji, moduł H (pełne zapewnienie jakości). Na etapie projektowania producent stosuje system zapewnienia jakości. Stosowna jednostka notyfikowana ocenia, zatwierdza (certyfikuje) i nadzoruje ten system oraz sprawdza zgodność projektu wyrobu (dokumentacji technicznej) z zasadniczymi wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia, a następnie wystawia certyfikat zatwierdzenia projektu. Na etapie produkcji producent zapewnia zgodność produkowanych wyrobów z zatwierdzonym projektem przez utrzymywanie systemu zapewnienia jakości produkcji oraz wydaje na tej podstawie odpowiednią deklarację zgodności tych wyrobów z zasadniczymi wymaganiami. Jednostka notyfikowana ocenia, zatwierdza (certyfikuje) i nadzoruje system zapewnienia jakości produkcji.

Wymagania związane z realizacją wymienionych procedur oceny zgodności, dotyczące systemów zapewnienia jakości na etapach projektowania i produkcji, są zawarte w normie międzynarodowej EN ISO 9001:2008 [176].

Z.2. Ocena akustyczna maszyn w ramach procesu oceny zgodności

Z.2.1. Dyrektywa maszynowa i dyrektywa hałasowa

Dyrektywa 2006/42/WE [150] wprowadza podział maszyn na tzw. szczególnie niebezpieczne i pozostałe oraz wyodrębnia urządzenia bezpieczeństwa – elementy maszyn związane z funkcjami bezpieczeństwa. Wykaz maszyn szczególnie niebezpiecznych znajduje się w załączniku IV do tej dyrektywy. Obejmuje on następujące maszyny szczególnie niebezpieczne:

- pilarki tarczowe do obróbki drewna lub mięsa
- strugarki wyrówniarki do obróbki drewna
- jednostronne strugarki grubiarki do obróbki drewna
- pilarki taśmowe do obróbki drewna i mięsa
- maszyny kombinowane do obróbki drewna
- wielowrzecionowe czopiarki do obróbki drewna
- frezarki do obróbki drewna
- przenośne pilarki do drewna
- prasy i krawędziarki do metali
- wtryskarki i formierki prasujące do gumy i tworzyw sztucznych
- maszyny do prac pod ziemią (lokomotywy, wózki hamulcowe, obudowy hydrauliczne, zmechanizowane)
- ręcznie ładowane pojazdy do zbierania odpadów z gospodarstw domowych, wyposażone w mechanizm prasujący
- odłączalne urządzenia do mechanicznego przenoszenia napędu wraz z osłonami
- osłony odłączalnych urządzeń do mechanicznego przenoszenia napędu
- podnośniki do obsługi pojazdów
- urządzenia do podnoszenia osób lub osób i towarów, stwarzające ryzyko upadku z wysokości większej niż 3 m
- przenośne maszyny montażowe i inne udarowe uruchamiane za pomocą nabojów
- urządzenia ochronne przeznaczone do wykrywania obecności osób
- napędzane mechanicznie ruchome osłony blokujące przeznaczone do zastosowania jako zabezpieczenie w maszynach
- układy logiczne zapewniające funkcje bezpieczeństwa
- konstrukcje chroniące przed skutkami wywrócenia (ROPS)
- konstrukcje chroniące przed spadającymi przedmiotami (FOPS).

W dyrektywie 2006/42/WE ustanowiono wymaganie stosowania różnych procedur oceny zgodności dotyczących maszyn i urządzeń w zależności od tego, czy są one wymienione w załączniku IV, czy też nie. W odniesieniu do maszyn i urządzeń o stosunkowo wysokim poziomie ryzyka związanego z ich użytkowaniem, wymienionych w załączniku IV, stosuje się moduły A, B lub H. Pozostałe rodzaje maszyn i urządzeń podlegają najmniej rygorystycznej proce-

durze, tj. wewnętrznej kontroli produkcji (moduł A bez udziału jednostki notyfikowanej).

W zakresie ochrony przed hałasem w dyrektywie 2006/42/WE ustanowiono następujące wymagania:

- maszyna musi być zaprojektowana i wykonana w taki sposób, aby ryzyko wynikające z emisji hałasu zostało ograniczone do możliwie najniższego poziomu, z uwzględnieniem postępu technicznego i dostępności środków ograniczających poziom hałasu, w szczególności u źródła jego powstawania
- poziom emisji hałasu może być mierzony przez odniesienie do danych porównawczych emisji dla podobnej maszyny
- instrukcja obsługi maszyny powinna zawierać informację o hałasie emitowanym przez maszynę
- w instrukcji obsługi muszą być zawarte informacje dotyczące instalacji i montażu maszyny, mające na celu zmniejszenie hałasu lub drgań mechanicznych
- instrukcja obsługi maszyny musi zawierać następujące parametry dotyczące emisji hałasu:
  - poziom emitowanego ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową A na stanowiskach pracy, jeżeli przekracza on 70 dB; jeżeli poziom ten nie przekracza 70 dB, należy to wskazać w instrukcji
  - szczytową chwilową wartość ciśnienia akustycznego skorygowaną charakterystyką częstotliwościową C na stanowiskach pracy, jeżeli przekracza ona 63 Pa (130 dB w stosunku do 20 μPa)
  - poziom mocy akustycznej maszyny skorygowany charakterystyką częstotliwościową A, jeżeli poziom emitowanego ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy skorygowany charakterystyką częstotliwościową A przekracza 80 dB.

Wartości wymienionych parametrów powinny być zmierzone dla danej maszyny albo ustalone na podstawie pomiarów wykonanych dla technicznie porównywalnej maszyny.

W przypadku bardzo dużych maszyn zamiast poziomu mocy akustycznej skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A dopuszcza się określenie

poziomów ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A w określonych punktach otoczenia maszyny.

Omawiana dyrektywa dopuszcza przypadki braku dla danej maszyny normy zharmonizowanej dotyczącej pomiarów poziomu dźwięku. Poziomy te mierzy się metodą najbardziej odpowiednią dla danej maszyny. Ilekroć podane są wartości dotyczące emisji dźwięku, należy określić niepewności pomiarowe tych wartości. Należy opisać warunki pracy maszyny podczas pomiarów i zastosowane metody pomiaru.

Gdy stanowisko lub stanowiska pracy nie są lub nie mogą być określone, poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową A mierzy się w odległości 1 m od powierzchni maszyny i na wysokości 1,6 m od podłoża lub podestu, z którego możliwy jest dostęp do maszyny. Podaje się wtedy wartość najwyższego zmierzonego ciśnienia akustycznego oraz określa się miejsce, w którym dokonano pomiaru. Gdy szczegółowe dyrektywy WE określają inne wymagania dotyczące pomiarów ciśnienia akustycznego czy mocy akustycznej, należy się do tych dyrektyw stosować.

Natomiast w dyrektywie tzw. hałasowej 2000/14/WE [148] ustalono wykaz maszyn podlegających ograniczeniu hałasu, dopuszczalne wartości poziomu mocy akustycznej tych maszyn (tab. Z-2), wykaz maszyn podlegających oznakowaniu gwarantowanego poziomu mocy akustycznej, procedury oceny zgodności, metody pomiaru hałasu (z przywołaniem norm europejskich) oraz procedury badania hałasu maszyn objętych wymienionymi wykazami (łącznie 57 typów maszyn).

Tabela Z-2. Dopuszczalne poziomy mocy akustycznej maszyn emitujących hałas do środowiska (wg dyrektywy 2000/14/WE [148])

Typ urządzenia	**Zainstalowana moc netto, *P*, kW Moc elektryczna, P_{el}[1)], kW Masa urządzenia *M*, kg Szerokość cięcia *L*, cm**	**Dopuszczalny poziom mocy akustycznej dB/1pW**	
		etap I od 1 maja 2004 r.	**etap II od 3 stycznia 2006 r.**
Maszyny do zagęszczania (walce wibracyjne, płyty wibracyjne, ubijaki wibracyjne)	$P \leq 8$	108	105[2)]
	$8 < P \leq 70$	109	106[2)]
	$P > 70$	$89 + 11 \log P$	$86 + 11 \log P$[2)]

Tabela Z-2, cd.

Typ urządzenia	Zainstalowana moc netto, P, kW Moc elektryczna, P_{el} [1)], kW Masa urządzenia M, kg Szerokość cięcia L, cm	Dopuszczalny poziom mocy akustycznej dB/1pW	
		etap I od 1 maja 2004 r.	etap II od 3 stycznia 2006 r.
Spycharki gąsienicowe, ładowarki gąsienicowe, koparko-ładowarki gąsienicowe	$P \leq 55$	106	103
	$P > 55$	89 + 11 log P	84 + 11 log P [2)]
Spycharki kołowe, ładowarki kołowe, koparko-ładowarki kołowe, wywrotki, równiarki, ugniatarki wysypiskowe typu ładowarkowego, wózki podnośnikowe napędzane silnikiem spalinowym z przeciwwagą, żurawie samojezdne, maszyny do zagęszczania (walce niewibracyjne), układarka do nawierzchni, zmechanizowane hydrauliczne przetwornice ciśnienia	$P \leq 55$	104	101
	$P > 55$	89 + 11 log P	82 + 11 log P [2, 3)]
Koparki, dźwigi budowlane do transportu towarów (napędzane silnikiem spalinowym), wciągarki budowlane, redlice motorowe	$P \leq 15$	96	93
	$P > 15$	83 + 11 log P	80 + 11 lg P
Ręczne kruszarki do betonu i młoty	$m \leq 15$	107	105
	$15 < m < 30$	94 + 11 log m	92 + 11 log m [2)]
	$m \geq 30$	96 + 11 log m	94 + 11 log m
Żurawie wieżowe		98 + log P	96 + log P
Agregaty prądotwórcze i spawalnicze	$P_{el} \leq 2$	97 + log P_{el}	95 + log P_{el}
	$2 < P_{el} \leq 10$	98 + log P_{el}	96 + log P_{el}
	$P_{el} > 10$	97 + log P_{el}	95 + log P_{el}
Agregaty sprężarkowe	$P \leq 15$	99	97
	$P > 15$	97 + 2 log P	95 + 2 log P
Kosiarki do trawników, przycinarki do trawników, przycinarki krawędziowe do trawników	$L \leq 50$	96	94 [2)]
	$50 < L \leq 70$	100	98
	$70 < L \leq 120$	100	98 [2)]
	$L > 120$	105	103 [2)]

[1)] P_{el} – dla agregatów spawalniczych: umowny prąd spawania pomnożony przez umowne napięcie w stanie obciążenia dla najmniejszej wartości współczynnika obciążenia, podanego przez producenta.
P_{el} – dla agregatów prądotwórczych: moc podstawowa, zgodnie z ISO 8528-1:1993, pkt 13.3.2.
[2)] Wartości poziomu mocy akustycznej dla etapu II są jedynie orientacyjne dla następujących typów urządzeń:
– walce wibracyjne prowadzone
– płyty wibracyjne (> 3 kW)
– ubijaki wibracyjne
– spycharki (gąsienicowe)

– ładowarki (gąsienicowe > 55 kW)
– wózki podnośnikowe, napędzane silnikiem spalinowym, z przeciwwagą
– układarki do nawierzchni wyposażone w listwę do zagęszczania (z wyjątkiem układarki wyposażonej w listwę do intensywnego zagęszczania)
– ręczne kruszarki do betonu napędzane silnikiem spalinowym i młoty mechaniczne ($15 < m < 30$)
– kosiarki do trawników, przycinarki do trawników, przycinarki krawędziowe do trawników.

Ostateczne wartości będą zależały od zmiany dyrektywy 2000/14/WE wynikającej ze sprawozdania przewidzianego w art. 20 ust. 1 tej dyrektywy. W przypadku braku takiej zmiany wartości dla etapu I będą stosowane dla etapu II.

[3)] W przypadku jednosilnikowych żurawi samojezdnych wartości z etapu I mają zastosowanie do dnia 3 stycznia 2008 r. Po tej dacie stosuje się wartości z etapu II.

Dopuszczalny poziom mocy akustycznej zaokrągla się do najbliższej liczby całkowitej (część ułamkowa mniejsza niż 0,5 –
do mniejszej liczby, równa 0,5 lub większa – do większej liczby).

Z.2.2. Normy zharmonizowane z dyrektywą 2006/42/WE

Dyrektywa 2006/42/WE [150] jest jedną z dyrektyw harmonizacji technicznej, w których ustalono podstawowe wymagania, zwłaszcza w dziedzinie zdrowia i bezpieczeństwa użytkowników i konsumentów. Na podstawie tych dyrektyw Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) ustanawia europejskie normy zharmonizowane dotyczące szczegółowych wymagań w zakresie projektowania i wytwarzania określonych wyrobów oraz ich badania (normy te wchodzą jednocześnie w życie we wszystkich państwach członkowskich).

Normy europejskie dotyczące bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w zakresie projektowania, a także budowy maszyn i urządzeń, tworzą zhierarchizowaną strukturę. Dzielą się na następujące typy:

- A – normy podstawowe, które obejmują pojęcia podstawowe, zasady projektowania (konstruowania) oraz ogólne zagadnienia odnoszące się do wszystkich rodzajów maszyn i urządzeń
- B – normy problemowe, których przedmiotem są określone aspekty bezpieczeństwa mające zastosowanie w wielu różnych rodzajach maszyn i urządzeń, przy czym:
  - B1 – dotyczą szczególnych aspektów bezpieczeństwa (np. bezpiecznych odległości, hałasu, temperatury)
  - B2 – dotyczą urządzeń ochronnych (np. oburęcznych urządzeń sterowania, urządzeń blokujących, bezdotykowych urządzeń ochronnych)
- C – normy szczegółowe, zawierające szczegółowe wymagania bezpieczeństwa w odniesieniu do określonych rodzajów maszyn lub grup maszyn.

Normy z zakresu hałasu, zharmonizowane z dyrektywą 2006/42/WE dotyczącą maszyn, przedstawiono w tab. Z-3 i Z-4. Obejmują one następujące główne zagadnienia:

- określanie wielkości emisji hałasu maszyn i urządzeń
- deklarowanie emisji hałasu maszyn i urządzeń oraz porównywanie wartości emisji
- projektowanie maszyn i urządzeń o ograniczonym hałasie
- projektowanie stanowisk pracy o zmniejszonym hałasie (obejmujące maszyny i urządzenia)
- określanie skuteczności akustycznej środków technicznych redukcji hałasu, takich jak obudowy maszyn, tłumiki, ekrany akustyczne, kabiny dla personelu.

Spośród tych norm można wyróżnić:

- normy ogólne (normy typu B)
- normy specyficzne dla całej rodziny maszyn (normy typu C), które z kolei obejmują:
  - normy bezpieczeństwa (zawierające klauzulę „hałas", gdy jest on zidentyfikowany jako znaczące zagrożenie dla danej rodziny maszyn)
  - procedury badania hałasu (ustalające w odniesieniu do norm typu B stosowane metody pomiaru emisji hałasu, położenie stanowiska pracy lub stanowisk pracy, warunki montażu i pracy maszyn podczas pomiaru itp.).

Ze względu na ujęte w dyrektywie maszynowej 2006/42/WE wymagania z zakresu ochrony przed hałasem (scharakteryzowane w podrozdziale Z.2.1), szczególnie istotne znaczenie w realizacji procedur oceny zgodności maszyn w zakresie oceny akustycznej mają znormalizowane metody umożliwiające wyznaczanie parametrów charakteryzujących emisję hałasu maszyn ujęte w formie trzech serii norm. Pierwsza seria [181–186]) dotyczy wyznaczania poziomu ciśnienia akustycznego emisji w określonym miejscu w pobliżu maszyny (źródła hałasu) i zawiera następujące metody:

- metodę techniczną w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk [182]

- metodę orientacyjną w warunkach in situ [183]
- metody orientacyjne i techniczne wymagające poprawek środowiskowych [185]
- metody wyznaczania poziomów ciśnienia akustycznego emisji na podstawie poziomów mocy akustycznej [184]
- metodę wyznaczania poziomów ciśnienia akustycznego emisji na podstawie pomiarów natężenia dźwięku [186].

Tabela Z-3. Przegląd norm ogólnych z zakresu akustyki (normy typu B) opracowanych na poziomie ISO i CEN w celu spełnienia wymagań dyrektywy 2006/42/WE (zharmonizowanych z dyrektywą 2006/42/WE)

Nr normy EN ISO lub EN	**Temat**
3741 ÷ 3747 (7 norm) [166- 172]	Emisja hałasu maszyn. Wyznaczanie poziomu mocy akustycznej na podstawie pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego
9614 (2 normy) [178, 180]	Emisja hałasu maszyn. Wyznaczanie poziomu mocy akustycznej na podstawie pomiarów natężenia dźwięku
11200 ÷ 11205 (6 norm) [181-186]	Emisja hałasu maszyn. Wyznaczanie poziomu ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach
4871 [173]	Deklarowanie i weryfikowanie wartości emisji hałasu maszyn
11689 [191]	Porównywanie danych o emisji hałasu maszyn
11688 (1 część) [189]	Projektowanie maszyn o ograniczonym hałasie
11690 (3 części) [192-194]	Projektowanie wyposażonych w maszyny stanowisk pracy o ograniczonym hałasie
11546 (2 części) [187, 188]	Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości obudów maszyn
11957 [198]	Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości kabin
7235 [175] 11691 [195] 11820 [196]	Wyznaczanie parametrów akustycznych tłumików
11821 [197]	Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości ekranów
5136 [174]	Wyznaczanie poziomu mocy akustycznej wentylatorów
12549 [200]	Metoda techniczna badania hałasu narzędzi

Tabela Z-4. Normy ogólne z akustyki przemysłowej (normy typu B), opracowane w celu spełnienia wymagań dyrektywy 2006/42/WE, przeznaczone dla ośrodków normalizacyjnych

Nr normy EN lub EN ISO	Temat
1746 [164]	Zasady przygotowania klauzul „hałasu" w normach bezpieczeństwa
12001 [199]	Zasady przygotowania procedur badania hałasu (dla określonej rodziny maszyn)

Dwie następne serie norm ([165-172, 178-180]) dotyczą metod określania poziomów mocy akustycznej i zawierają:

- metody wymagające przeprowadzenia pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego:
  - dokładne w komorach pogłosowych [166]
  - techniczną porównawczą w pomieszczeniach o ścianach odbijających dźwięk [167]
  - techniczne w pomieszczeniach pogłosowych [168]
  - techniczną w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk [169]
  - dokładną w komorach bezechowych i bezechowych z odbijającą podłogą [170]
  - orientacyjną [171]
  - porównawczą w warunkach in situ [172]
- metody wymagające przeprowadzenia pomiarów poziomu natężenia dźwięku:
  - metodę stałych punktów [178]
  - metody omiatania [179, 180].

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w przypadku wyznaczania poziomu mocy akustycznej maszyn większość jednostek biorących udział w procesach oceny zgodności maszyn stosuje metody wymagające przeprowadzenia pomiarów ciśnienia akustycznego. Charakterystyki tych metod zamieszczono w tab. Z-5.

Tabela Z-5. Charakterystyka znormalizowanych metod wyznaczania poziomów mocy akustycznej maszyn i urządzeń na podstawie poziomów ciśnienia akustycznego

Symbol normy PN-EN ISO	**Klasyfikacja metody**	**Środowisko badawcze**	**Objętość źródła**	**Charakter hałasu**	**Poziomy mocy akustycznej możliwe do uzyskania**	**Dostępne informacje nieobowiązkowe**
3741	dokładna (klasa 1)	komora pogłosowa	zaleca się mniejszą niż 1% objętości pomieszczenia pomiarowego	ustalony, o widmie szerokopasmowym	w pasmach 1/3-oktawowych lub oktawowych	skorygowany poziom mocy akustycznej A
3743-1	techniczna (klasa 2)	pomieszczenie pomiarowe o ścianach odbijających dźwięk		ustalony, o widmie szerokopasmowym wąskopasmowym lub dyskretnym	skorygowany charakterystyką częstotliwościową A i w pasmach oktawowych	inne skorygowane poziomy mocy akustycznej
3743-2		specjalne pomieszczenie pogłosowe				
3744	techniczna (klasa 2)	na zewnątrz albo w dużym pomieszczeniu	największy wymiar mniejszy niż 15 m	dowolny	skorygowany charakterystyką częstotliwościową A i w pasmach 1/3-oktawowych lub oktawowych	charakterystyka kierunkowa i poziomy ciśnienia akustycznego jako funkcja czasu; inne skorygowane poziomy mocy akustycznej
3745	dokładna (klasa 1)	komora bezechowa albo bezechowa z odbijającą podłogą	zaleca się mniejszą niż 0,5% objętości pomieszczenia pomiarowego	dowolny		
3746	orientacyjna (klasa 3)	nie jest wymagane specjalne środowisko pomiarowe	brak ograniczeń; ograniczona tylko przez dostępne środowisko pomiarowe	dowolny	skorygowany charakterystyką częstotliwościową A	poziomy ciśnienia akustycznego jako funkcja czasu; inne skorygowane poziomy mocy akustycznej

Załącznik 2

Dopuszczalne wartości hałasu na stanowiskach pracy w Polsce

Dopuszczalne wartości hałasu na stanowiskach pracy w Polsce zostały określone w rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [159]. Zgodnie z tym rozporządzeniem hałas na stanowiskach pracy jest charakteryzowany przez:

- poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy i odpowiadającą mu ekspozycję dzienną lub poziom ekspozycji na hałas odniesiony do tygodnia pracy i odpowiadającą mu ekspozycję tygodniową (wyjątkowo w przypadku hałasu oddziałującego na organizm człowieka w sposób nierównomierny w poszczególnych dniach w tygodniu)
- maksymalny poziom dźwięku A
- szczytowy poziom dźwięku C.

Dopuszczalne, ze względu na ochronę słuchu, wartości hałasu obowiązują jednocześnie i nie powinny przekraczać następujących wartości:

- poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy nie powinien przekraczać wartości 85 dB, a odpowiadająca mu ekspozycja dzienna nie może przekraczać wartości $3{,}64 \cdot 10^3$ $Pa^2 \cdot s$ lub poziom ekspozycji na hałas odniesiony do tygodnia pracy nie powinien przekraczać wartości 85 dB, a odpowiadająca mu ekspozycja tygodniowa nie powinna przekraczać wartości $18{,}2 \cdot 10^3$ $Pa^2 \cdot s$
- maksymalny poziom dźwięku A nie może przekraczać wartości 115 dB
- szczytowy poziom dźwięku C nie może przekraczać wartości 135 dB.

Natomiast w rozporządzeniu ministra gospodarki i pracy w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne [153] (wdrażającym postanowienia dyrektywy 2003/10/WE

[149]) wprowadzono dodatkowe wartości kryterialne, tzw. wartości progów działania, przy których należy podejmować określone działania eliminujące lub ograniczające ryzyko zawodowe związane z narażeniem na hałas. Są to:

- poziom ekspozycji na hałas, $L_{EX,8h}$ lub $L_{EX,w}$ = 80 dB
- szczytowy poziom dźwięku C L_{pCpeak} = 135 dB.

Do działań, które trzeba podejmować, zalicza się przede wszystkim informowanie pracowników o ryzyku zawodowym i sposobach jego eliminowania lub ograniczania oraz dostarczanie pracownikom środków ochrony indywidualnej słuchu.

Literatura

[1] Allman-Ward M., Williams R., Dunne G., Jennings P.: *The evaluation of vehicle sound quality using a NVH simulator.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[2] Antoniak M.: *Warunki pracy w Polsce na tle krajów UE – wyniki Europejskiego Badania Warunków Pracy*. Bezpieczeństwo Pracy 2011, nr 9, s. 26-28.

[3] Asawarungsaengkul K., Nanthavanij S.: *Design of optimal noise hazard control strategy with budget constraint.* International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2006, vol. 12, nr 4, s. 355-367.

[4] Asawarungsaengkul K., Nanthavanij S., Chalidabhongse J.: *Decision support system for designing effective noise hazard prevention strategies.* International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2007, vol. 13, nr 4, s. 451-470.

[5] Becker M.: *Genetic algorithms for noise reduction in tire design.* [W:] IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Taipei, 8-11 October 2006, 5304-5308.

[6] Belda N., Flindell I., Reig A.: *Automotive interior sound quality: The UK part of a large international comparative study.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[7] *Bezpieczeństwo i higiena pracy.* Red. D. Koradecka. Warszawa, CIOP-PIB 2008.

[8] Bodden M.: *Instrumentation for sound quality evaluation.* Acoustica – Acta Acustica 1997, vol. 83, s. 775-783.

[9] Bowen D.L., Carow J.P.: *Use of consumer listening panels to enhance sound quality.* Appliance Engineer, May 2001, s. 1-7.

[10] Bowen D.L.: *Sound quality studies of front-loading washing machines.* Sound&Vibration, December 2010, s. 8-13.

[11] Cempel C., Kasprzak J., Kłos Z.: *Ekoinżynieria – ku holistycznemu projektowaniu i zarządzaniu środowiskiem*. [W:] Ogólnopolska konferencja naukowa: Zrównoważony rozwój w teorii ekonomii i praktyce. Wrocław, 29-30 czerwca 2006, http://www.kee.ae.wroc.pl, [materiał na prawach rękopisu], http://neur.am.put.poznan.pl/cempel/Wroclaw_CC_ZK_JK.pdf

[12] Cerrato G.: *Automotive sound quality – powertrain, road and wind noise.* Sound&Vibration, April 2009, s. 16-24.

[13] *Changes over time – First findings from the fifth European Working Conditions Survey, European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions,* http://www.eurofound.europa.eu/pubdocs/2010/74/en/3/EF1074EN.pdf

[14] Chen K., Huang Y., Ma M., Wang N.: *Adaptive grouped paired comparison in subjective sound quality evaluation.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2009. Ottawa, August 23-26, 2009.

[15] Cho W.H., Ih J.G, Toi T.: *Quality check of automotive window motors using the sound quality metrics.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[16] Churchill C., Maluski S., Cox T.: *Simplified sound quality assessment for UK.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[17] en.wikipedia.org/wiki/Sound-quality.

[18] Engel Z., Engel J., Kosała K.: *Procesy wibroakustyczne. Źródła, badania, analiza.* Kraków, AGH 2009.

[19] Engel Z., Engel J., Kosała K., Sadowski J.: *Podstawy akustyki obiektów sakralnych.* Kraków-Radom, ITE-PIB 2007.

[20] Engel Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem.* Warszawa, Wyd. Nauk. PWN 2001.

[21] Engel Z., Piechowicz J., Pleban D., Stryczniewicz L.: *Hale przemysłowe, maszyny i urządzenia – wybrane problemy wibroakustyczne.* Warszawa, CIOP-PIB 2009.

[22] Engel Z., Piechowicz J., Pleban D., Stryczniewicz L.: *Minimalizacja przemysłowych zagrożeń wibroakustycznych. Poradnik.* Warszawa, CIOP-PIB 2005.

[23] Engel Z., Piechowicz J., Stryczniewicz L.: *Podstawy wibroakustyki przemysłowej*. Kraków, AGH 2003.

[24] Engel Z., Pleban D.: *Hałas maszyn i urządzeń – źródła, ocena.* Warszawa, CIOP 2001.

[25] Engel Z., Pleban D., Stryczniewicz L.: *Determination of emission sound pressure levels using inversive method.* [W:] Proceedings of the 12th International Conference Noise Control'01. Kielce 2001, s. 293-295.

[26] Engel Z., Pleban D., Stryczniewicz L.: *Determination of emission sound pressure levels using parameters of substitute models of machines.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2003. Jeju 2003, s. 3237-3244.

[27] Engel Z., Pleban D., Stryczniewicz L.: *Inversive method of determination of emission sound pressure levels for the purposes of the acoustic assessment of machines.* [W:] Proceedings of the 8th International Congress on Sound and Vibration. Hong-Kong 2001, s. 1607-1614.

[28] Engel Z., Pleban D., Stryczniewicz L.: *Investigation of emission sound pressure using inversive method.* Archives of Acoustics 2002, vol. 27, nr 4, s. 277-290.

[29] Engel Z., Sadowski J.: *Hałas i wibracje w środowisku.* Warszawa, Wyd. Ligi Ochrony Przyrody 1992.

[30] Engel Z.: *Wskaźnikowe metody w wibroakustyce.* [W:] Materiały z XXXVIII Ogólnopolskiego Sympozjum Diagnostyki Maszyn. Wisła, 28 lutego – 4 marca 2011, s. 29-37.

[31] Engel Z.: *Zagrożenie wibroakustyczne a rozwój zrównoważony.* [W:] Materiały z seminarium CIOP-PIB, 22 lutego 2012.

[32] Engel Z., Zawieska W.M.: *Hałas i drgania w procesach pracy.* Warszawa, CIOP-PIB 2010.

[33] European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, http://www.eurofund.europa.eu

[34] European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions. Fifth European Working Conditions Survey – 2010, http://www.eurofound.europa.eu/surveys/ewcs/2010/index.htm

[35] European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions. Fourth European Working Conditions Survey – 2006, http://www.eurofund.europa.eu/pubdocs/2006/98/en/2/ef0698en.pdf

[36] Fry J., Jennings P., Giudice S., Williams R., Dunne G.: *Development and evaluation of "powerful" and "refined" neural networks for the efficient choice of automotive sound quality targets.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[37] Fry J., Jennings P., Williams R., Dunne G.: *Understanding how customers make their decisions on product sound quality.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[38] Gallant D.P., Davies P., Surprenant A.M.: *Sound attributes of motor driven devices in automobiles. [W:] Proceedings of Inter Noise 2004.* Prague, August 22-25, 2004.

[39] Genuit K.: *Particular importance of psychoacoustics for sound design of quiet vehicles.* [W:] Proceedings of of Inter Noise 2011. Osaka, September 4-7, 2011.

[40] Genuit K.: *Sound quality metrics for vehicle interior noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2011. Osaka, September 4-7, 2011.

[41] Ginn K.B., Haslev H., Nielsen J.B.: *Practical application of sound quality technique in pump development.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[42] Giudice S., Giudice R., Jennings P., Cain R.: *Capturing driver profiles and behaviour during on-road assessments of vehicle sound quality.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2009. Ottawa, August 23-26, 2009.

[43] Giudice S., Jennings P., Cain R., Humpreys L., Song W.: *Perceptual dimensions for electric vehicle sound quality.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[44] Giudice S., Jennings P., Fry J., Williams R., Allman-Ward M., Dunne G.: *Development and evaluation of a new sound quality evaluation approach for interactive NVH simulators.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[45] Goldberg D.E.: *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania.* Warszawa, WNT 2003.

[46] Gwiazda T.D.: *Algorytmy genetyczne. Kompendium.* T. 1. *Operator krzyżowania dla problemów numerycznych.* Warszawa, PWN 2007.

[47] Hashimoto T.: *Tradeoff level of the visual scenery and seat/floor vibrations to the perception of sound quality of car interior noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[48] Hashimto T., Hatano S., Tsuchida T., Kitahara S., Takao H.: *Improvement of sound quality of car interior noise by introducing porous intake duct.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2011. Osaka, September 4-7, 2011.

[49] Hatano S., Hashimoto T.: *Desirable order spectrum pattern for better sound quality of car interior noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2005. Rio de Janeiro, August 7-10, 2005.

[50] Hatano S., Hashimoto T.: *Sound quality evaluation of tire-pavement noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[51] Hatano S., Hashimoto T.: *Sound quality tuning of a printer noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[52] Heinrichs R., Groemping U.: *Customer driven diesel vehicle sound quality.* [W:] Proceedings Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[53] Horvat M., Domitrović H., Jambrošić K.: *Sound quality evaluation of hand-held power tools.* Acta Acustica United With Acustica 2012, vol. 98, s. 487-504.

[54] http://www.lyoncorp.com/soundquality.html

[55] Ih J.G., Shin S.H., Choo W.S., Kim G.J.: *Sound quality prediction of tire pattern noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[56] International INCE Symposium BUY QUIET 2011, http://www.bruit.fr/buyquiet

[57] Ishida K., Okoshi M.: *Sound quality evaluation using fluctuation sound analysis for machinery noise and sound of nature.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2011. Osaka, September 4-7, 2011.

[58] Jae-Eung O., Sang-Gil P., Ho-San K., Ho P.: *Construction of sound quality index for a vehicle HVAC system using regression and neural network model.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[59] Jailani M., Nor M., Fouladi M.H., Nahvi H., Ariffin A.K.: *Index for vehicle acoustical comfort inside a passenger car.* Applied Acoustics 2008, vol. 69, issue 4, s. 343-353.

[60] *Jakość – encyklopedia zarządzania*, http://mfiles.pl/pl/index.php/Jakosc

[61] *Jakość – historia zarządzania jakością*, http://www.jakosc.biz/jakosc-ogolnie/historia-jakosci.html

[62] Jeong C.H., Cho W.H., Ih J.G.: *Objective evaluation of engine noise quality with the change of engine oil.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[63] Jung O.: *On the acoustical quality of conversational speech inside vehicles.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[64] Jurč R., Jiřiček O.: *Choice of auditory attributes for evaluation of product.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[65] Jurč R., Jiřiček O.: *Differences in influence of loudness on sense of pleasantness.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2005. Rio de Janeiro, August 07-10, 2005.

[66] Jurč R., Jiřiček O.: *Psychoacoustic and objective testing of product sound quality.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[67] Kang K.T., Byun U.S.: *Sound quality development for passenger vehicle.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[68] Kang M.J., Kim J.D., Han J.S., Kim H.S., Lee M.R.: *Noise qualification index for refrigerator aligned with consumers.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[69] Kihlman T., Kropp W., Larsson K.: *The importance of engineering acoustics,* http://www.ljudlandskap.acoustics.nu/downloads/ljudbok/specialister/kapitel_3/rubrik1/1Introduction.pdf

[70] Kim S.S., Yoo D.H., Hwang D.K., Oh J.E.: *The sound quality evaluation of an automotive HVAC system.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2005. Rio de Janeiro, August 07-10, 2005.

[71] Kitahara S., Takao H., Hashimoto T.: *Relation between sound quality of car interior noise at acceleration and the order spectrum profile.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[72] Klemenz M.: *A sound synthesis model for sound-quality optimisation of starting electric railbound vehicles.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[73] Kubo N., Mellert V., Weber R., Meschke J.: *Categorisation of engine sound.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[74] Lan T-S., Chiu M-Ch.: *Identification of noise sources in factory's sound field by using genetic algorithm.* Applied Acoustics 2008, vol. 69, s. 733-750.

[75] Lee J., Joo J., Lee J.: *Design modification to improve the quality of sound for the refrigerator.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2005. Rio de Janeiro, August 07-10, 2005.

[76] Lee S.K., Gu J., Kim J., Lee E.Y., Yang J.Y.: *Development on the sound index for the evaluation of sound quality of a refrigerator using artificial neural network.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[77] Lin S.H., Pei H.S.: *Sound quality by design – a successful product development story.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[78] Lipowczan A.: *Identyfikacja zagrożenia i metody ograniczania hałasu w górnictwie węgla kamiennego.* Katowice, Prace GIG 1978.

[79] Lyon R.H.: *Product sound quality – from design to perception.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[80] Lyon R.H.: *Product sound quality – from perception to design*. Sound and Vibration, March 2003, s. 18-22.

[81] Magill M., Genell A., Kleiner M., Västfjäll D., Beltman W.M.: *Sound quality aspects of small computer fans.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[82] Makarewicz G., Zawieska W.M.: *Zastosowanie algorytmów genetycznych do aktywnej redukcji hałasu*. Bezpieczeństwo Pracy 2003, nr 1, s. 4-6.

[83] Manolas D.A., Gialamas T., Tsahalis D.T.: *A genetic algorithm for the simultaneous optimization of the sensor and actuator positions for an active noise and/or vibration control system.* [W:] Proceedings of Inter Noise 96. Liverpool, 30 July-2 August 1996, s. 1187-1191.

[84] Minorikawa G., Hasegawa S.: *Study on improvement of sound quality in mechanical design*. [W:] Proceedings of Inter Noise 2011. Osaka, September 4-7, 2011.

[85] Morzyński L.: *Genetic algorithms in exposure to noise limitation,* www.perosh.eu/p/8J3CRT

[86] Morzyński L.: *Wykorzystanie algorytmów genetycznych do ograniczania zawodowej ekspozycji na hałas.* Bezpieczeństwo Pracy 2011, nr 10, s. 9-12.

[87] *Nauka o pracy – bezpieczeństwo, higiena, ergonomia*. T. 2. *Prawna ochrona pracy.* Red. D. Koradecka. Warszawa, CIOP 2000.

[88] Nishiguchi M., Minorikawa G., Ito T.: *Improvement of sound quality of small fan for information devices.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[89] Nowicka E.: *Metody oceny jakości akustycznej pomieszczeń długich. Rozprawa doktorska.* Warszawa, ITB 2009.

[90] Nykänen H.: *Proposal for the principles to set noise output limits for machinery and equipment in Finland.* [W:] Proceedings Inter Noise 1988. Avignon 1988, s. 1703-1706.

[91] Oh J.E., Park S.G., Lee H.J., Lee G.T., Lee J.Y.: *Analysis of the HVAC system's "Loud" and "Sharp" using design of experiments.* [W:] Proceedings of ICSV13, Vienna, July 2-6, 2006.

[92] Ohtomi K., Hosaka R.: *Product sound design for diverse customer's sansei.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2009. Ottawa, August 23-26, 2009.

[93] *Opracowanie tematyczne OT-600. Energetyka wiatrowa a społeczności lokalne.* Kancelaria Senatu, Biuro Analiz i Dokumentacji, kwiecień 2011 r.

[94] Orhon B.E., Belek H.T.: *Sound quality in washing machines.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[95] Parent T.A., Vermeylen G., van Houten G., Lyly Y.J., Cabrita J., Niedhammer J.: *Eurofound: Fifth European Working Conditions Survey*. Luxembourg, Publications Office of European Union 2012, http://www.eurofound.europa.eu/surveys/stm/ewcs/results.htm [data dostępu: 23 kwietnia 2012].

[96] Park D.H., Lee S.K.: *Sound quality evaluation for a passenger car based on customer preference index.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[97] Peng W., Jin C., Zhou H.: *An experimental study on the influence of tire noise on the sound quality of car interior noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[98] Piechowicz J.: *Global index of the acoustic climate.* Archives of Acoustics 2004, vol. 29, nr 3, s. 411-425.

[99] Piechowicz J.: *Programowanie klimatu akustycznego pomieszczeń przemysłowych.* Zeszyty Naukowe – Mechanika 2004, t. 23, z. 2, s. 271-280.

[100] Piechowicz J., Stryczniewicz L., Wawrzeńczyk-Zdżyłowska A.: *Wskaźnikowa ocena akustyczna hali przemysłowej – kuźni.* [W]: Materiały L Otwartego Seminarium z Akustyki OSA 2003. Szczyrk – Gliwice 2003, s. 118-122.

[101] Piechowicz J.: *Wskaźnikowa metoda oceny akustycznej hal przemysłowych.* [Rozprawa doktorska]. Kraków, AGH 1999.

[102] Pietila G., Cerrato G.: *Sound quality guidelines for non-automotive products.* Sound&Vibration, April 2012, s. 8-16.

[103] Pinho M.E., Bernardi M.A.: *Non-stationary characteristics effects on refrigerators sound quality.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2005. Rio de Janeiro, August 7-10, 2005.

[104] Pleban D.: *A global index of acoustic assessment of machines – results of experimental and simulation tests.* International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2011, vol. 17, nr 3, s. 277-286.

[105] Pleban D.: *Acoustic assessment of engine-generators with the use of global index.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[106] Pleban D.: *Acoustic modelling of machines using the inversion method for the purposes of the acoustic assessment of machines.* Archives of Acoustics 2007, vol. 32, nr 2, s. 321-327.

[107] Pleban D.: *Acoustic modelling of machines using the inversion method.* [W:] Proceedings of the 14th International Congress on Sound & Vibration. Cairns 2007.

[108] Pleban D.: *Computer simulation of the indices of the acoustic assessment of machines.* Archives of Acoustics 1999, vol. 24, nr 4, s. 443--453.

[109] Pleban D., Engel Z.: *A proposal for acoustic assessment of machines based on emission index.* Sigurnost 2001, vol. 43, nr 4, s. 287-295.

[110] Pleban D., Engel Z., Gawlik M.: *Ocena akustyczna maszyn na podstawie wskaźnika emisyjnego*. Przegląd Mechaniczny 2000, nr 21-22, s. 29-34.

[111] Pleban D., Engel Z., Stryczniewicz L.: *Investigation of emission sound pressure levels using parameters of substitute models of machines.* GESTS International Transaction on Acoustic Science and Engineering 2005, vol. 3, nr 1, s. 47-54.

[112] Pleban D., Engel Z., Stryczniewicz L., Piechowicz J.: *Experimental tests on vibroacoustic phenomena in machinery.* GESTS International Transaction on Acoustic Science and Engineering 2004, vol. 2, nr 1, s. 49-59.

[113] Pleban D.: *Experimental modelling and research on vibroacoustic phenomena in machines.* Archives of Acoustics 2004, vol. 29, nr 2, s. 219--233.

[114] Pleban D.: *Method of acoustic assessment of machinery based on global acoustic quality index.* Archives of Acoustics 2010, vol. 35, nr 2, s. 223-235.

[115] Pleban D.: *Ocena akustyczna maszyn.* [Rozprawa doktorska]. Kraków, AGH 1996.

[116] Pleban D.: *Results of simulation tests of a global index proposed for the acoustic assessment of machines.* [W:] Proceedings of 20th International Congress on Acoustics ICA 2010. Sydney, August 23-27, 2010.

[117] Podgórski D., Miareczko B., Pleban D.: *Ocena zgodności maszyn oraz środków ochrony zbiorowej i indywidualnej z wymaganiami bezpieczeństwa pracy i ochrony zdrowia.* Warszawa, CIOP 2001.

[118] Pottie S., Botteldooren D.: *Optimal placement of secondary sources for active noise control using a genetic algorithm*. [W:] Proceedings of Inter Noise 96. Liverpool, 30 July-2 August 1996, s. 1101-1104.

[119] Roussarie V., Siekierski E., Viollon S.: *What's so hot about sound? – influence of HVAC sound on thermal comfort.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2005. Rio de Janeiro, August 7-10, 2005.

[120] *Ryzyko zawodowe. Metodyczne podstawy oceny.* Red. W.M. Zawieska. Warszawa, CIOP-PIB 2007.

[121] Sadowski J.: *Akustyka środowiska i architektury a rozwój zrównoważony.* [W:] Materiały z LI Otwartego Seminarium z Akustyki. Gdańsk-Sobieszewo, 6-10 września 2004, s. 95-102.

[122] Sha D.Q., Jiao F.L., Liu K., Gu F.S., Ball A.D., Jiang J.: *Objective evaluation of car noise by means of support vector machine.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[123] Shin S.H., Hatano S.: *Sound quality evaluation of exhaust note of motor cycles.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[124] Shin S.H., Ih J.G., Hashimoto T., Hatano S.: *Sound quality evaluation of the booming sensation for passenger cars.* Applied Acoustics 2009, vol. 70, s. 309-320.

[125] *Strategia rozwoju kraju 2010.* Warszawa, Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, listopad 2011 r.

[126] Suzuki T., Nelson P.A., Hamada H.: *Searching and identification of noise sources using genetic algorithm.* [W:] Proceedings of Inter Noise 96. Liverpool, 30 July-2 August 1996, s. 2815-2820.

[127] Takada M., Arase S., Tanaka K., Iwamiya S.I.: *Economic valuation of the sound quality of machinery noise using conjoint analysis: the effect of sound presentation on economic valuation.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[128] Takada M., Onoda S.I., Hoshi A., Iwamiya S.I.: *Effect of temporal structure of operating sounds on the sound quality of noise emitted from a copy machine.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2010. Lisbon, June 13-16, 2010.

[129] Takada M., Yamano H., Iwamiya S.I.: *Economic valuation of the sound quality of machinery noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2004. Prague, August 22-25, 2004.

[130] Tsuchida T., Takao H., Kitahara S., Aritake Y.: *Optimum configuration of intake duct system integrating porous duct for pleasant interior noise.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2009. Ottawa, August 23-26, 2009.

[131] Van der Auweraer H., Wyckaert K., Hendricx W.: *From sound quality to the engineering of solutions for NVH problems: case studies.* Acoustica – Acta Acustica 1997, vol. 83, nr 5, s. 796-804.

[132] Wang Y.S.: *Sound quality estimation for nonstationary vehicle noises based on discrete wavelet transform*. Journal of Sound and Vibration 2009, 324, s. 1124-1140.

[133] *Warunki pracy w 1995-2010 r*. Warszawa, Główny Urząd Statystyczny, 1996-2011.

[134] Wawak S.: *Historyczny rozwój definicji jakości*, http://www.wawak.pl/pl/content/historyczny-rozwoj-definicji-jakosci

[135] Wawak T.: *System jakości ISO 9000.* Kraków, Uniwersytet Jagielloński 1996.

[136] Wawak T.: *Zarządzanie przez jakość.* Kraków, Uniwersytet Jagielloński 1995.

[137] Werner J.C., Soleto J., Lima R.G., Fogarty T.C.: *Active noise control in ducts using genetic algorithms.* [W:] Proceedings of Active 2002. Southampton, July 15-17, 2002, vol. 1, s. 243-254.

[138] Workshop *Towards a greater awareness of low-noise outdoor machinery*, http://www.eutrio.be/pressrelease/workshop-towards-greater-awareness-low-noise-outdoor-machinery

[139] Yamaguchi M., Horita H., Kuboki M., Toi T.: *Sound quality evaluation by physiological information under complex stimuli.* [W:] Proceedings of Inter Noise 2009. Ottawa, August 23-26, 2009.

[140] Yoshizumi K., Ohta K., Honda I., Suganuma N., Ajiro K.: *Prediction of engine sound and sound quality control using wavelet transform.* ICSV13. Vienna, July 2-6, 2006.

[141] You J., Jeon J.Y.: *Just noticeable difference of sound quality metrics of refrigerator noise*. [W:] Proceedings of Inter Noise 2006. Honolulu, December 3-6, 2006.

[142] Żyszkowski Z.: *Podstawy elektroakustyki.* Warszawa, Wyd. Naukowo-Techniczne 1984.

Akty prawne i normy

[143] Council Decision 93/465/EEC of 22 July 1993 concerning the modules for the of various phases of the for the conformity assessment procedures and the rules for the affixing and use of the CE conformity marking, which is intended to be used in the technical harmonization directives. OJ L 220 30.08.1993.

[144] Council Directive 93/68/EEC of 22 July 1993 amending Directives 87/404/EEC (simple pressure vessels), 88/378/EEC (safety of toys), 89/106/EEC (construction products), 89/336/EEC (electromagnetic compatibility), 89/392/EEC (machinery), 89/686/EEC (personal protective equipment), 90/384/EEC (non-automatic weighting instruments), 90/385/EEC (active implantable medicinal devices), 90/396/EEC (appliances burning gaseous fuels), 91/263/EEC (telecommunications terminal equipment), 92/42/EEC (new hot-water boilers fired with liquid or gaseous fuels) and 73/23/EEC (electrical equipment designed for use within certain voltage limits), OJ L 220, 30.08.1993.

[145] Council Resolution of 7 May 1985 on a new approach to technical harmonization and standards. OJ C 136, 04.06. 1985.

[146] Council Resolution of 21 December 1989 on a global approach to conformity assessment. OJ C 010, 16.01.1990.

[147] Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady nr 768/2008/WE z dnia 9 lipca 2008 r. w sprawie wspólnych ram dotyczących wprowadzania produktów do obrotu, uchylającą decyzję Rady 93/465/EWG. OJ L 218,13.8.2008.

[148] Directive 2000/14/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2000 on the approximation of the laws of the Member States relating to the noise emission in the environment by equipment for use outdoors. OJ L 162, 3.7.2000.

[149] Directive 2003/10/EC of the European Parliament and of the Council of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise) (Seventeenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). OJ 42/38, 15.2.2003.

[150] Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast) (Text with EEA relevance). OJ L 157, 9.6.2006.

[151] Directive of the European Parliament and of the Council 98/37/EC of 22 June 1998 on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery. OJ L 207, 23.07.1998 [dyrektywa wycofana].

[152] Dyrektywa 2005/88/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 grudnia 2005 r. zmieniająca dyrektywę 2000/14/WE w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do emisji hałasu do środowiska przez urządzenia używane na zewnątrz pomieszczeń. OJ L 344; 5 27.12.2005.

[153] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne. DzU nr 157, poz. 318.

[154] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 15 lutego 2006 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń używanych na zewnątrz pomieszczeń w zakresie emisji hałasu do środowiska. DzU nr 32, poz. 223.

[155] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn i elementów bezpieczeństwa. DzU nr 259, poz. 2170 [rozporządzenie wycofane].

[156] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń używanych na zewnątrz pomieszczeń w zakresie emisji hałasu do środowiska. DzU nr 263, poz. 2202.

[157] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn. DzU nr 199, poz. 1228.

[158] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 maja 2007 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń używa-

nych na zewnątrz pomieszczeń w zakresie emisji hałasu do środowiska. DzU nr 105, poz. 718.

[159] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU nr 217, poz. 1833, późn. zm.

[160] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 765/2008 z dnia 9 lipca 2008 r. ustanawiające wymagania w zakresie akredytacji i nadzoru rynku odnoszące się do warunków wprowadzania produktów do obrotu i uchylające rozporządzenie (EWG) nr 339/93, OJ L 218,13.8.2008.

[161] The Single European Act, Luxembourg, 17 February 1986, http://www.ec.europa.eu/economy_finance/emu_history/documents/treaties/singleuropeanact.pdf

[162] The Treaty of Rome, 25 March 1957, http://www.ec.europa.eu/economy_finance/emu_history/documents/treaties/rometreaty2.pdf

[163] BS 5750 Quality systems, 1979.

[164] PN-EN ISO 1746:2002 Maszyny. Bezpieczeństwo – Zasady przygotowania rozdziałów o hałasie w normach bezpieczeństwa (EN 1746:1998).

[165] PN-EN ISO 3740:2003 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu – Wytyczne stosowania norm podstawowych (EN ISO 3740:2000).

[166] PN-EN ISO 3741:2011 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metody dokładne w komorach pogłosowych (EN ISO 3741:2010).

[167] PN-EN ISO 3743-1:2011 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metody techniczne dotyczące małych, przenośnych źródeł w polach pogłosowych – Część 1: Metoda porównawcza w pomieszczeniu pomiarowym o ścianach odbijających dźwięk (EN ISO 3743-1:2010).

[168] PN-EN ISO 3743-2:2010 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metody techniczne dotyczące małych, przenośnych źródeł w polach pogłosowych – Metody w specjalnych pomieszczeniach pogłosowych (EN ISO 3743-1:2009).

[169] 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 (EN ISO 3744:2010).

[170] PN-EN ISO 3745:2010 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metody dokładne w komorach bezechowych i w komorach bezechowych z odbijającą podłogą (EN ISO 3745:2009).

[171] 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 (EN ISO 3746:2010).

[172] PN-EN ISO 3747:2011 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metoda techniczna i orientacyjna w warunkach in situ w środowisku pogłosowym (EN ISO 3747:2010).

[173] PN-EN ISO 4871:2010 Akustyka – Deklarowanie i weryfikowanie wartości emisji hałasu maszyn i urządzeń (EN ISO 4871:2009).

[174] PN-EN ISO 5136:2009 Akustyka – Określenie mocy akustycznej emitowanej do kanału przez wentylatory oraz inne urządzenia do przetłaczania powietrza – Metoda kanałowa (EN ISO 5136:2009).

[175] PN-EN ISO 7235:2009 Akustyka – Metody laboratoryjne pomiaru tłumików kanałowych oraz elementów końcowych – Tłumienie wtrącenia, hałas przepływu i strata ciśnienia całkowitego (EN ISO 7235:2009).

[176] PN-EN ISO 9001:2009 Systemy zarządzania jakością. Wymagania (EN ISO 9001:2008).

[177] PN-EN ISO 9004:2010 Zarządzanie ukierunkowane na trwały sukces organizacji – Podejście wykorzystujące zarządzanie jakością (EN ISO 9004:2009).

[178] PN-EN ISO 9614-1:2010 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów natężenia dźwięku – Metoda stałych punktów pomiarowych (EN ISO 9614:2009).

[179] PN-EN ISO 9614-2:2000 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów natężenia dźwięku – Metoda omiatania (EN ISO 9614-2:1996).

[180] PN-EN ISO 9614-3:2010 Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów natężenia dźwięku – Część 3: Dokładna metoda omiatania (EN ISO 9614-3:2009).

[181] PN-EN ISO 11200:2011 Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Wytyczne stosowania podstawowych norm dotyczących wyznaczania poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach (EN ISO 11200:2009).

[182] PN-EN ISO 11201:2010 Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Pomiar poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach – Metoda techniczna w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk (EN ISO 11201:2009).

[183] PN-EN ISO 11202:2010 Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Pomiar poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach – Metoda orientacyjna w warunkach in situ (EN ISO 11202:2010).

[184] PN-EN ISO 11203:2010 Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Wyznaczanie poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach na podstawie poziomu mocy akustycznej (EN ISO 11203:2009).

[185] PN-EN ISO 11204:2010 Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Pomiar poziomów ciśnienia akustycznego emisji na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach z zastosowaniem przybliżonych poprawek środowiskowych (EN ISO 11204:2010).

[186] PN-EN ISO 11205:2010 Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia. Metoda techniczna wyznaczania poziomów ciśnienia akustycznego emisji w warunkach in situ na stanowisku pracy i w innych określonych miejscach na podstawie pomiarów natężenia dźwięku (EN ISO 11205:2009).

[187] PN-EN ISO 11546-1:2010 Akustyka – Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości obudów – Część 1: Pomiary w warunkach laboratoryjnych (dla celów deklaracji) (EN ISO 11546-1:2009).

[188] PN-EN ISO 11546-2:2010 Akustyka – Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości obudów – Część 2: Pomiary w warunkach terenowych (dla celów akceptacji i weryfikacji) (EN ISO 11546-2:2009).

[189] PN-EN ISO 11688-1:2010 Akustyka – Zalecany sposób postępowania przy projektowaniu maszyn i urządzeń o ograniczonym hałasie – Część 1: Projektowanie (EN ISO 11688-1:2009).

[190] PN-EN ISO 11688-2:2004 Akustyka – Zalecane procedury dotyczące projektowania redukcji hałasu maszyn i urządzeń – Część 2: Wprowadzenie do projektowania środków ograniczenia hałasu (EN-ISO 11688-2:2000).

[191] PN-EN ISO 11689:2000/AC:2009 Akustyka – Procedura porównywania danych o emisji hałasu maszyn i urządzeń (EN ISO 11689:1996/AC:2009).

[192] PN-EN ISO 11690-l:2000 Akustyka – Zalecany sposób postępowania przy projektowaniu miejsc pracy o ograniczonym hałasie, wyposażonych w maszyny – Część 1: Wytyczne redukcji hałasu (EN ISO 11690-1:1996).

[193] PN-EN ISO 11690-2:2000 Akustyka – Zalecany sposób postępowania przy projektowaniu miejsc pracy o ograniczonym hałasie, wyposażonych w maszyny – Część 2: Środki redukcji hałasu (EN ISO 11690-2:1996).

[194] PN-EN ISO 11690-3:2002 Akustyka – Zalecany sposób postępowania przy projektowaniu miejsc pracy o ograniczonym hałasie, wyposażonych w maszyny – Część 3: Propagacja dźwięku i prognozowanie hałasu w pomieszczeniach pracy (EN-ISO 11690-3:1998).

[195] PN-EN ISO 11691:2009 Akustyka – Pomiary tłumienia wtrącenia tłumików kanałowych bez przepływu – Laboratoryjna metoda orientacyjna (EN ISO 11691:2009).

[196] PN-EN ISO 11820:2000 Akustyka – Pomiary tłumików hałasu w miejscu zainstalowania (EN ISO 11820:1996).

[197] PN-EN ISO 11821:2005 Akustyka – Pomiar tłumienia dźwięku przez przestawny ekran w warunkach terenowych (EN ISO 11821:1997).

[198] PN-EN ISO 11957:2010 Akustyka – Wyznaczanie dźwiękoizolacyjnych właściwości kabin – Pomiary laboratoryjne i terenowe (EN ISO 11957:2009).

[199] PN-EN ISO 12001:2010 Akustyka – Hałas emitowany przez maszyny i urządzenia – Zasady opracowania i prezentacji procedury badania hałasu (EN ISO 12001:2009).

[200] PN-EN 12549+A1:2008 Akustyka – Procedura badania hałasu narzędzi z napędem do montażu łączników – Metoda techniczna (EN 12549:1999+A1:2008).

[201] PN-EN ISO/IEC 17000:2006 Ocena zgodności. Terminologia i zasady ogólne (EN ISO/IEC 17000:2004).

[202] PN-EN ISO/IEC 17025:2005 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących (EN ISO/IEC 17025:2005).

[203] PN-ISO 8402:1996 Jakość. Terminologia [norma wycofana].

[204] PN-ISO 9000:2006 System zarządzania jakością. Podstawy i terminologia [EN ISO 9000:2005].

[205] PN-ISO 9001:1996 Systemy jakości. Model zapewnienia jakości w projektowaniu, pracach rozwojowych, produkcji, instalowaniu i serwisie [norma wycofana].

[206] PN-ISO 9002:1996 Systemy jakości. Model zapewnienia jakości w produkcji, instalowaniu i serwisie [norma wycofana].

[207] PN-ISO 9003:1996 Systemy jakości. Model zapewnienia jakości w kontroli i badaniach końcowych [norma wycofana].