

ZASTOSOWANIE METOD SYMULACJI KOMPUTEROWEJ W BADANIACH HAŁASU PRZEMYSŁOWEGO

19.1 WPROWADZENIE

Uciążliwość nadmiernego hałasu w miejscu pracy i w środowisku życia człowieka jest nadal jednym z największych problemów cywilizacyjnych. Pomimo wszczętych działań naprawczych zagadnienie dotyczy dużej ilości osób. Rocznik statystyczny przemysłu z 2014 [17] roku podaje, że w warunkach zagrożenia nadmiernym hałasem pracuje 170 tysięcy pracowników (na 290 tys. zatrudnionych w warunkach zagrożenia czynnikami związanymi ze środowiskiem pracy).

Działania zmierzające do ograniczenia nadmiernego hałasu na stanowisku pracy opisane zostały przez autora w szeregu publikacji [2, 7-10]. W pracach tych przedstawiono usystematyzowany ciąg czynności, których realizacja pozwoli zaprojektować rozwiązania akustyczne spełniające oczekiwania, tzn. zmniejszające hałas na stanowisku pracy do wartości mniejszych od dopuszczalnych przy minimalizacji kosztów podejmowanych rozwiązań. Jednym z etapów opisywanej procedury jest wykonanie analizy symulacyjnej pola akustycznego w badanej przestrzeni przemysłowej. Zastosowanie symulacji komputerowej może mieć różnoraki cel. Szczegółowe możliwości zastosowania tej techniki zostaną opisane w dalszej części artykułu. Realizacja symulacji komputerowej odbywać się może z zastosowaniem metody opisanej w normie PN-ISO 9613-2:2002 pt.: „Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólne metody obliczeń”. Jest ona zaimplementowana w większości środowisk obliczeniowych, które realizują zadania z zakresu tworzenia strategicznych map hałasu, tj.: CadnaA, Immi, LimaA, czy Sound-Plan. Wykorzystanie metody ISO 9613-2 ogranicza się do analizy propagacji dźwięku w przestrzeniach otwartych, a więc w środowisku zewnętrznym. W przypadku symulacji zjawisk akustycznych w przestrzeni zamkniętej (np. wewnątrz hal przemysłowych) stosowane są algorytmy obliczeniowe wykorzystujące metody geometrycznej analizy pola akustycznego, które wspomagane są m. in. poprzez oprogramowanie Raynoise i Odeon Industrial. W niniejszym artykule przedstawione zostaną techniczne oraz pozatechniczne aspekty zastosowania symulacji komputerowej dla zjawisk akustycznych wykorzystywanych w działaniach zmierzających do ograniczenia nadmiernego hałasu.

19.2 METODY SYMULACJI ZJAWISK AKUSTYCZNY

Geneza akustycznych narzędzi symulacyjnych sięga prac publikowanych w latach 30-tych XX wieku. W publikacjach [12, 18] autorzy przedstawili pierwsze koncepcje symulacji zjawisk akustycznych. W roku 1962 w [19] przedstawiono założenia metody śledzenia promieni opartej na geometrycznej analizie propagacji energii, występującej w przestrzeni zamkniętej. Metodę opracowano dla analizy zjawisk optycznych. Zakłada ona, że promienie generowane ze źródła energii, podlegają odbiciu od powierzchni ograniczających. Za każdym razem, gdy promień uderza w powierzchnię jego energia jest odbijana w wielu kierunkach i tłumiona zgodnie ze współczynnikiem absorpcji powierzchni. W roku 1985 niniejszą metodę zaadaptowano w akustyce [11]. Jej rozwinięciem była metoda wiązki śledzącej, którą opisano w pozycji [5]. Pojedyncze promienie energii zastąpiono w niej rozpraszoną wiązką.

Inną metodą stosowaną w analizie pola akustycznego jest metoda źródeł pozornych. Po raz pierwszy została ona opisana w 1979 roku, w publikacji [1]. W niniejszej metodzie ściany pomieszczeń zastępuje się układem pozornych źródeł dźwięku. Analiza polega na śledzeniu drogi, pokonywanej przez promień dźwięku, od źródła do mikrofonu, punktu obserwacji. Bieg czoła fali śledzony jest wzdłuż kierunku propagacji i pozwala na wskazanie znaczących odbić dźwięku.

Obecnie, w analizie pola akustycznego, stosowane są sposoby połączenia obu metod: promieniowej i źródeł pozornych [6, 20]. Metoda promieniowa służy do analizy rozprzestrzeniania się promieni (wiązek) i widoczności źródła względem odbiornika, natomiast metoda źródeł pozornych służy do śledzenia drogi pokonywanej przez promień akustyczny, od źródła dźwięku do odbiornika.

19.3 PROCES REALIZACJI SYMULACJI KOMPUTEROWEJ ZJAWISK AKUSTYCZNYCH

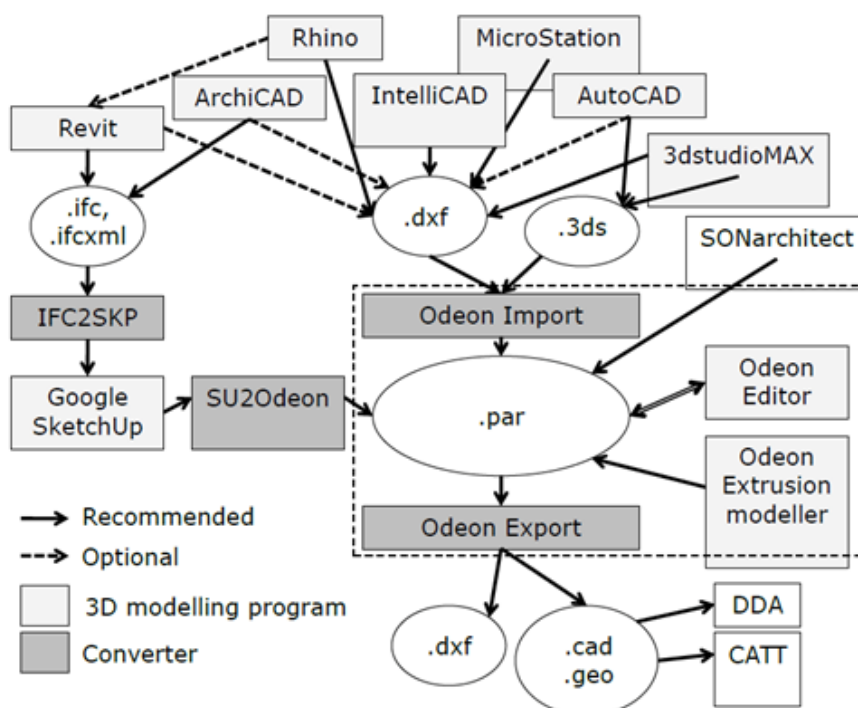
Badania symulacyjne pola akustycznego, przeprowadzane w celu ograniczenia hałasu, poprzedza szereg działań przygotowawczych. Należy do nich m.in.: wykonanie pomiarów geometrycznych badanej przestrzeni, przeprowadzenie pomiarów akustycznych oraz wyznaczenie poziomu mocy akustycznej zidentyfikowanych źródeł [2, 7, 10]. Dostarczają one informacji potrzebnej zarówno do budowy modelu geometrycznego i akustycznego, jak i do oceny wiarygodności wyników pozyskiwanych z symulacji. Istotne jest, by przed rozpoczęciem działań projektowych, posiadać komplet informacji o badanym obiekcie. Pozwala ona, bowiem, już na etapie badań wstępnych, wskazać prawdopodobne w zastosowaniu rozwiązania przeciwhałasowe lub zweryfikować wartości wyciszenia hałasu, których oczekuje inwestor. Ponieważ badany obiekt jest często usytuowany w znacznej odległości od miejsca przeprowadzania zadań projektowych, dlatego też przebieg działań wstępnych i pomiarowych powinien zostać rzetelnie zaplanowany. Brak koordynacji prac organizacyjnych może skutkować niepełnym rozeznaniem stanu środowiska i wywoływać konieczność ponowienia lub uzupełnienia badań, które zazwyczaj wpływają na opóźnienie realizacji projektu i zwiększają jego koszty.

19.3.1 Budowa modelu geometrycznego

W opinii autora artykułu, budowa modelu geometrycznego obiektu jest etapem najbardziej pracochłonnym. Wynika, bowiem z niekompletności lub nadmiarowości informacji przekazywanej w ramach dokumentacji technicznej przez inwestora.

Przekazywane zasoby obejmują zazwyczaj plany hal produkcyjnych, które przechowywane są w wersji papierowej. Utworzenie modelu geometrycznego jest wtedy zadaniem szczególnie żmudnym, wymagającym posiłkowania się informacją pozyskaną z dodatkowych pomiarów hal lub zdjęć uzupełniających ogląd sytuacji. Skrajnie odmiennym przypadkiem jest przekazanie przez inwestora dokumentacji w wersji elektronicznej. Rysunki takie charakteryzują się zazwyczaj nadmiarowością danych. W poszczególnych warstwach zapisu zamieszczone są, bowiem informacje dotyczące położenia instalacji różnych mediów, konstrukcji uzupełniających budowlę oraz opisy ciągów technologicznych i transportowych.

W przypadku realizacji badań w środowisku zewnętrznym sytuacja jest zazwyczaj prostsza. Obliczenia wykonywane są w oparciu o normę PN-ISO 9613-2:2002. Zgodnie z jej zapisami, miasta posiadające powyżej 100 tys. mieszkańców, mają obowiązek dysponowania strategiczną mapą hałasu podległych terenów. Numeryczny model powinien również obejmować obszar zakładów przemysłowych zlokalizowanych na obszarze miasta. Pozyskanie danych informatycznych, opisujących badany teren, znacznie przyspiesza utworzenie geometrycznego modelu analizowanego obszaru.



Rys. 19.1 Powiązanie programu Odeon z aplikacjami graficznymi

Źródło: [4]

Budowa modelu geometrycznego odbywa się z wykorzystaniem narzędzi klasy CAD lub 3D. Powiązanie programu Odeon z aplikacjami graficznymi przedstawia rys. 19.1. Na uwagę zasługuje możliwość współpracy programu Odeon z narzędziem Trimble

SketchUp (dawniej zwanym Google SketchUp). Połączenie obu systemów umożliwia bezpośredni zapis modelu w formacie PAR, który jest wykorzystywany w dalszych pracach nad projektem [3, 14]. W procesie modelowania geometrycznego, którego efekty wykorzystywane zostaną w symulacji zjawisk akustycznych, należy zwrócić uwagę na następujące aspekty:

- dostosowanie poziomu szczegółowości modelu do przeprowadzanych obliczeń i oczekiwań klientów;
- wykonanie kompletnego modelu geometrycznego środowiska akustycznego, który zawiera również przewidywane środki ograniczające hałas np. ekrany akustyczne, elementy pochłaniające itp.;
- ograniczone wykorzystania modeli geometrycznych w symulacji zjawisk akustycznych do zamkniętych przestrzeni.

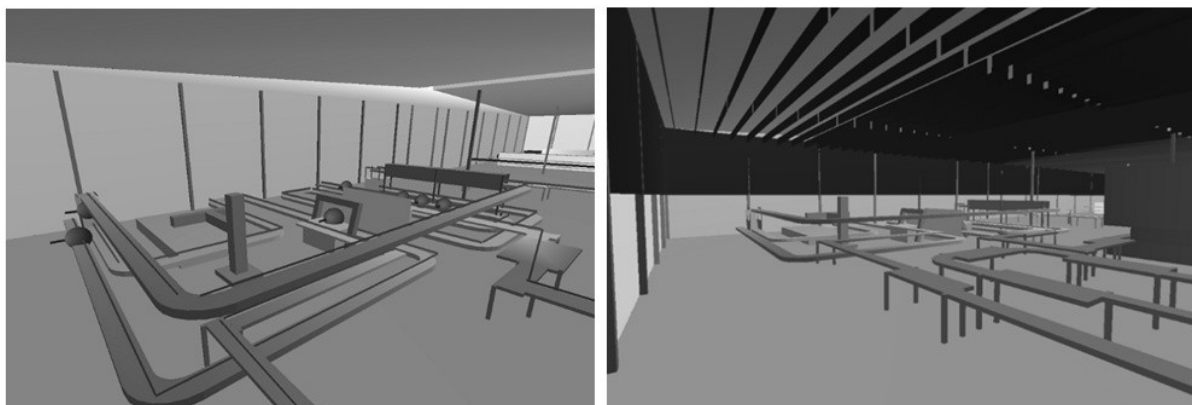
Dla opisywanego zastosowania budowa bardzo szczegółowego modelu jest w zdecydowanej mierze nieuzasadniona. Małe detale, posiadające niewielkie powierzchnie, nie mają wpływu na rozchodzenie się dźwięku i kształt pola akustycznego. Powodują natomiast znaczne wydłużenie czasu trwania obliczeń. Uwarunkowania nietechniczne mogą jednak wymuszać od projektanta zwiększenie stopienia szczegółowości. Przedstawienie rzeczywistego stanu obiektu na mapach, planach i widokach poglądowych projektu, posiadającego łatwo rozpoznawalne cechy konstrukcyjne, posiada, bowiem wartość marketingową, a atrakcyjna wizualizacja zaproponowanych zmian może wpłynąć na wybór lub/i końcową akceptację rozwiązań ujętych w projekcie redukcji hałasu (rys.19.2).



Rys. 19.2 Wygląd rzeczywistego obiektu przemysłowego i jego model geometryczny

Źródło: opracowanie własne

Ponieważ narzędzia wspomagające tworzenie modelu akustycznego posiadają ograniczoną funkcjonalność, a ich obsługa jest często bardzo czasochłonna, dlatego też istotne jest, aby modelowanie geometryczne, realizowane na wcześniejszym etapie w odrębnej aplikacji, obejmowało wszystkie składowe środowiska akustycznego, w tym również przewidywane środki ograniczające hałas. Wykonanie kompletnego modelu geometrycznego, obejmującego ekrany akustyczne i elementy pochłaniające, pozwala wykonać jednokrotnie proces importu danych i znacząco przyspiesza procedurę poszukiwania rozwiązań redukujących hałas (rys. 19.3).



Rys. 19.3 Model geometryczny hali z wyłączonymi i włączonymi dodatkowymi elementami pochłaniającymi

Źródło: opracowanie własne

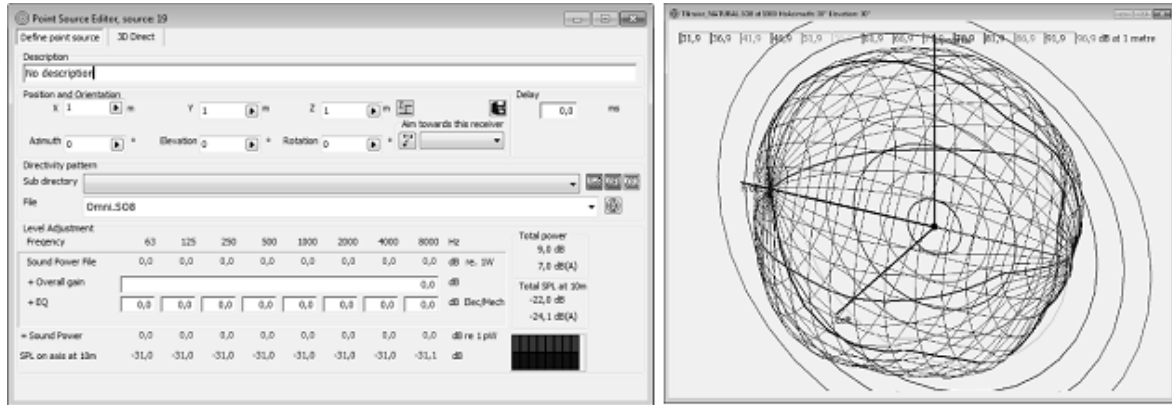
Należy pamiętać, że symulacja zjawisk akustycznych, oparta na modelach geometrycznych, jest ograniczona do przestrzeni zamkniętych. Dlatego też budując model geometryczny zwraca się szczególną uwagę na styk powierzchni sąsiadujących, które tworzą analizowaną przestrzeń akustyczną. Powierzchnie modelu powinny precyzyjnie się stykać, bez powstawania jakichkolwiek szczelin. Naturalne otwory występujące w obiekcie rzeczywistym takie jak: okna, drzwi, bramy czy wiaty, powinny zostać zamodelowane, jako elementy posiadające w modelu akustycznym przypisany współczynnik pochłaniania równy wartości 1. Promienie dźwięku padające na taką powierzchnię ulegną, bowiem całkowitemu pochłonięciu. Podobne rozwiązanie stosowane jest w analizie rozchodzenia się dźwięku w obiekcie otwartym (stadion czy amfiteatr), który umieszczony jest wewnątrz prostopadłościanu o ścianach posiadających współczynnik pochłaniania dźwięku również równy wartości 1.

19.3.2 Budowa modelu akustycznego

Poprawnie wykonany model geometryczny po zaimportowaniu do programu symulacyjnego podlega przekształceniu w model akustyczny. Poszczególnym powierzchniom modelu przypisywane są własności akustyczne, takie jak współczynnik pochłaniania rozproszenia i przenoszenia dźwięku. Istotnym ograniczeniem obliczeń jest wielkość wewnętrznej bazy danych programu symulacyjnego oraz ilość materiałów, które przypisywane są powierzchniom. W przypadku programu Odeon jest to tylko około 180. Dodatkowym ograniczeniem procesu budowy modelu akustycznego jest adekwatność wartości współczynników przypisanych materiałom do rzeczywiście występujących w badanym obiekcie. Dlatego też właściwym działaniem jest posiłkowanie się dostępnymi badaniami własności akustycznych materiałów i badaniami literaturowymi, które pozwalają na zbudowanie bazy materiałów dedykowanej dla rozpatrywanego przypadku.

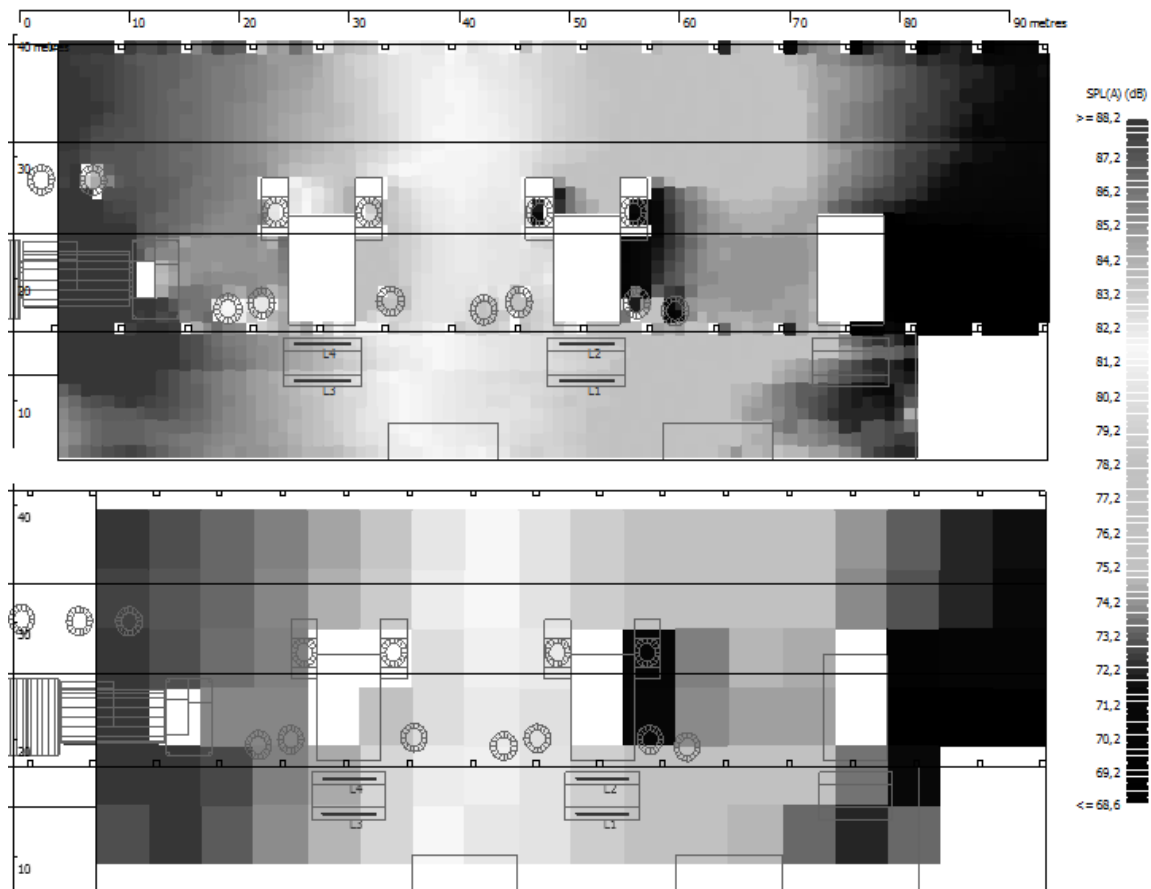
Kolejnym etapem procesu tworzenia modelu akustycznego jest zdefiniowanie źródeł dźwięku. Każde źródło opisywane jest poprzez: rodzaj (punktowe, liniowe, powierzchniowe), współrzędne lokalizacji, model kierunkowości [13] oraz parametry akustyczne, do których zalicza się m. in. poziom mocy akustycznej (rys. 19.4). Dane, opisujące źródło i wprowadzane do systemu, pochodzą z udostępnionej dokumentacji urządzeń

technicznych, stanowiących źródła dźwięku, lub z przeprowadzonych wcześniej pomiarów akustycznych. Pewnym utrudnieniem jest niejednoznaczność opisu parametrów wejściowych źródeł hałasu. Wyniki pomiarów i obliczeń poziomu mocy akustycznej, uzyskane np. zgodnie z metodą opisaną w normie PN-EN ISO 3746:1999 [15] są przetwarzane do postaci „akceptowanej” przez program symulacyjny.



Rys. 19.4 Sposób wprowadzania punktowego źródła dźwięku i określenia kierunkowości źródła dźwięku

Źródło: opracowanie własne



Rys. 19.5. Przykładowa mapa akustyczna uzyskana dla dwóch wartości odległości pomiędzy punktami węzłowymi siatki

a) Odległość 1m

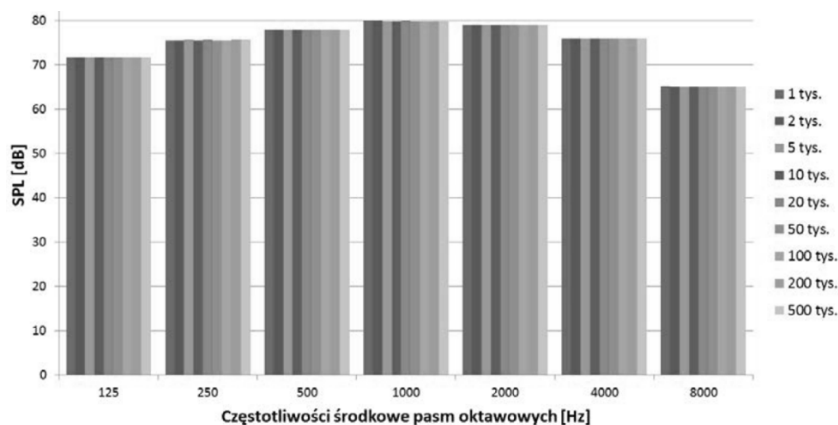
b) Odległość 5m

Źródło: opracowanie własne

Ostatnim elementem, składającym się na model akustyczny, są odbiorniki dźwięku. W zależności od celu przeprowadzanego badania, odbiornikami mogą być: pojedyncze punkty pomiarowe (ang. receivers) lub siatka odbiorcza (ang. receiver grid). Wykorzystanie punktów odbiorczych umożliwia uzyskanie dokładnych wyników symulacji przy dosyć krótkim czasie przeprowadzania obliczeń. Siatka odbiorcza znajduje natomiast zastosowanie przy generowaniu mapy pola akustycznego. Jest reprezentowana przez szereg punktów odbiorczych, identyfikujących jej węzły. Gęstość (odległości pomiędzy węzłami) siatki odbiorczej znacząco wpływa na czas obliczeń, ale również na wygląd mapy akustycznej. Rys. 19.5 przedstawia fragment mapy akustycznej uzyskanej dla gęstości siatki przyjmującej wartość 1 m (rys. 19.5a) oraz dla gęstości 5 m (rys. 19.5b). Dla obu przypadków wykonane zostały obliczenia, przy zastosowaniu jednakowych parametrów (ilości promieni, ilości odbić itd). W pierwszym przypadku czas trwania obliczeń wyniósł około 30 minut, w drugim - 1 minuty. Opisujący wzrost czasu wydaje się uzasadniony, jeśli zauważymy, że siatka o gęstości 1m reprezentowana jest przez 3060 punktów, natomiast siatka o gęstości 5 m zbudowana jest tylko z 108 węzłów. Dobór gęstości siatki odbiorczej jest w głównej mierze uzależniony od przeznaczenia mapy akustycznej. Mapa wykonywana w celu przeprowadzania szczegółowych analiz rozchodzenia się dźwięku w przestrzeni wymaga dużej dokładności, a zatem większej gęstości. Natomiast mapa, która ma mieć charakter poglądowy może być wykonana z mniejszą precyzją przy niższej gęstości.

19.3.3 Przeprowadzenie symulacji komputerowej

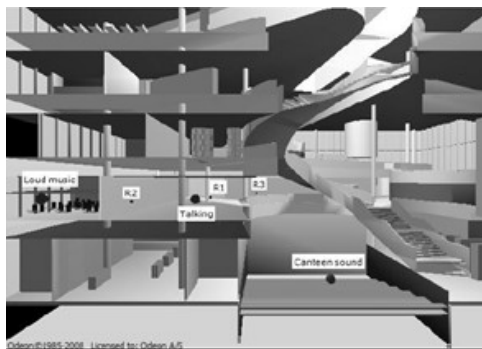
Poprawne przeprowadzenie symulacji komputerowej wymaga zdefiniowania zestawu parametrów dla obliczeń. Opis problemu przedstawiono w literaturze [13, 16]. Parametrem o najsilniej wpływającym na czas obliczeń jest ilość promieni generowanych ze źródła dźwięku. Badania przedstawione w [13] wykazały, że dla modelu akustycznego o niewielkiej złożoności, zmiana ilości promieni wpływa wyraźnie na zwiększenie czasu obliczeń (od 5 min dla 1000 promieni do 3h dla 500 tys. promieni), nie ma natomiast wpływu na uzyskiwane wartości wyników obliczeń (rys. 19.6). Przykład opublikowany w [16] wykazał natomiast niewielki wpływ ilości promieni dźwięku na wyniki symulacji w obszarze EDT i T_{30} (rys. 19.7).



Rys. 19.6 Wpływ ilości promieni źródła dźwięku na parametr SPL

Źródło:[13]

a)



b)

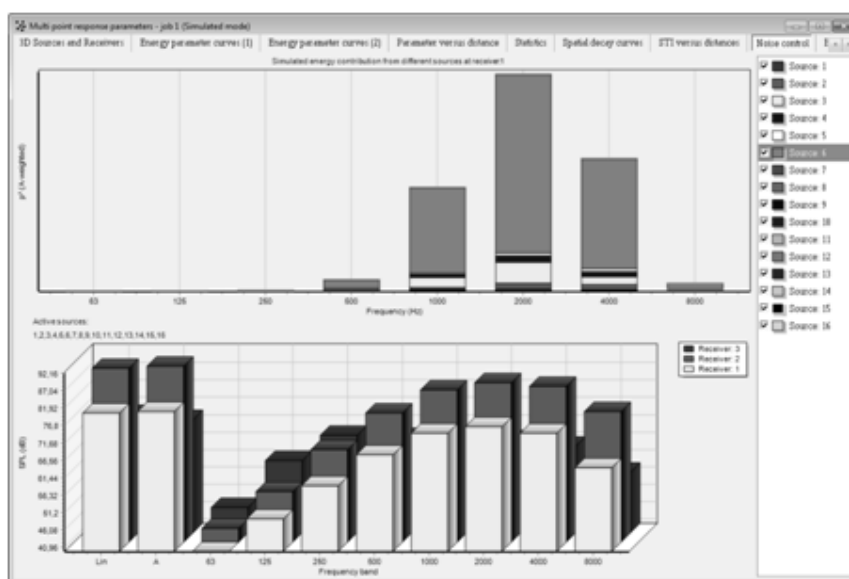
Number of rays	4 000	20 000	100 000	500 000
Calculation time (mm:ss)	00:06	00:24	02:03	10:40
Reflection density (per ms)	20	100	500	2 500
EDT at 1kHz (s)	2.82	2.15	2.29	2.40
T ₃₀ at 1kHz (s)	1.29	1.75	1.65	1.66
SPL, dB(A)	32.9	33.8	33.3	33.1
STI	0.37	0.38	0.34	0.36

Rys. 19.7 Wpływ ilości promieni źródła dźwięku na czas i wyniki obliczeń
a) Wygląd modelu b) Wyniki obliczeń

Źródło:[16]

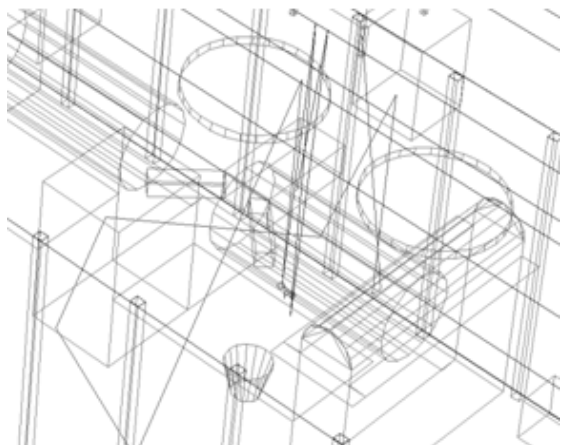
19.3.4 Prezentacja wyników symulacji komputerowej

Wyniki symulacji komputerowej zjawisk akustycznych mogą zostać zaprezentowane w wielorakiej formie. W zależności od celu realizacji badań symulacyjnych, efekt prac może zostać opublikowany w formie mapy pola akustycznego (rys. 19.5), rozkładu wybranych parametrów akustycznych w przestrzeni, graficznie (rys. 19.8) lub tabelarycznie. Inną, ciekawą formą prezentacji wyników jest analiza drogi rozchodzenia się promieni dźwięku od źródła (rys. 19.9) oraz rozchodzenia się czoła fali akustycznej generowanej przez źródło dźwięku (rys. 19.10).



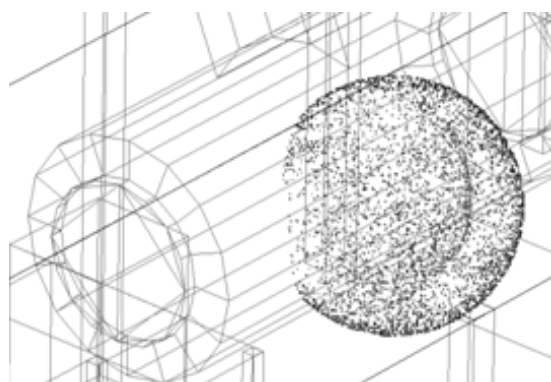
Rys. 19.8 Wykres wyników z przeprowadzonej symulacji zjawisk akustycznych

Źródło: opracowanie własne



Rys. 19.9 Analiza drogi rozchodzenia się promieni dźwięku

Źródło: opracowanie własne



Rys. 19.10 Analiza czoła fali akustycznej generowanej przez źródło dźwięku

Źródło: opracowanie własne

Ciekawą koncepcję wykorzystania komputerowej symulacji zjawisk akustycznych przedstawiono w [14]. Autorzy zauważyli problem statyczności modelu geometrycznego polegający na tym, że każda zmiana geometrii badanego obiektu wymaga przejścia całej ścieżki działań począwszy od zaimportowania modelu do programu symulacyjnego, poprzez budowę modelu akustycznego i na koniec ponownego przeprowadzenia procedury symulacji. Zaproponowane przez autorów rozwiązanie polega na połączeniu narzędzia symulacji zjawisk akustycznych z programem CAD, co ma zapewnić możliwość przeprowadzenia symulacji akustycznych w trakcie modyfikowania modelu geometrycznego. Opracowane rozwiązanie polega na zastosowaniu modelera Trimble SketchUp, który komunikuje się za pomocą połączenia sieciowego TCP / IP z zewnętrznym programem symulacyjnym Odeon™, realizującym obliczenia akustyczne.

PODSUMOWANIE

Hałas w halach przemysłowych jest wynikiem działania maszyn i urządzeń produkcyjnych, środków transportu wewnętrznego, urządzeń wentylacyjnych i innych. Duża liczba źródeł dźwięku rozmieszczona w niewielkiej przestrzeni hali produkcyjnej, wzajemne powiązania funkcjonalne oraz złożoność konstrukcyjna maszyn to czynniki utrudniające określenie istotności wpływu emisji hałasu, generowanego przez poszczególne podzespoły, na człowieka. Stosowane metody nie identyfikują jednoznacznie związku pomiędzy parametrami źródeł, a uzyskiwanymi pomiarowo wartościami poziomu dźwięku. Niemożliwe jest również dokładne oszacowanie skuteczności proponowanych rozwiązań przeciwhałasowych. Ważne jest, aby informacja o wymaganej wielkości ograniczenia emisji znana była już na etapie projektowania środków. Wdrożenie rozwiązań przeciwhałasowych jest, bowiem kosztowne, a ryzyko realizacji projektów, niespełniających wymagań inwestora, wysokie.

Rozwiązaniem opisywanych powyżej problemów jest wykorzystanie w symulacji zjawisk akustycznych narzędzi komputerowych. Analiza rozchodzenia się dźwięku w obiekcie, przeprowadzona metodą symulacji, daje możliwość wyciągnięcia wniosków

z ukształtowania się pola akustycznego, sterowania parametrami i lokalizacją źródeł dźwięku oraz zmiany umiejscowienia punktów, które reprezentują położenie pracowników wykonujących zadania służbowe. Poprzez modyfikację modelu, umożliwi również ocenę skuteczności proponowanych rozwiązań, w której kryteriami wyboru mogą być aspekty zarówno akustyczne jak i ekonomiczne.

LITERATURA

- 1 J. Allen, D. Berkley. „Image method for efficiently simulating smallroom.” *Journal of the Acoustical Society of America*, nr 4(65), 1979.
- 2 A. Boczkowski. „Komputerowe wspomaganie w procesie realizacji ocen oddziaływania akustycznego zakładów przemysłowych na środowisko.” R. Knosala. (red.) *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, t.2., Opole: Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2015, s. 372-383.
- 3 N. Che Din, N. A. A. Jalil, N. I. Keumala i A. S. Razak. „Acoustical investigation of open-plan offices in green building: Simulation experiment.” *Internoise 2014*, Melbourne Australia, 2014.
- 4 L. Christensen, G. Koutsouris. *Odeon Room Acoustics Software Version 12 User manual*, Lyngby: ODEON A/S, 2013.
- 5 N. Dadoun, D. Kirkpatrick i J. Walsh. „The Geometry of Beam Tracing,” *Association for Computer Machinery*, 1985.
- 6 J. Kaźmierczak, J. Świder. (red.) *Wspomaganie konstruowania układów redukcji drgań i hałasu maszyn*. Warszawa: WNT, 2001.
- 7 A. Kuboszek, A. Boczkowski. „Techniczne i pozatechniczne aspekty wdrażania innowacyjnych metod projektowania zabezpieczeń przeciwhałasowych w przemyśle. Etap I. Ekspertyza akustyczna.” J. Kaźmierczak, J. Bartnicka, (red.) *Zarządzanie innowacjami w produkcji i usługach. Monografia*. Opole: Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2014, s. 15-36.
- 8 A. Kuboszek, A. Boczkowski. „Techniczne i pozatechniczne aspekty wdrażania innowacyjnych metod projektowania zabezpieczeń przeciwhałasowych w przemyśle. Etap II. Projekt akustyczny.” J. Kaźmierczak, J. Bartnicka. (red.) *Zarządzanie innowacjami w produkcji i usługach. Monografia*. Opole: Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2014, pp. 35-48.
- 9 A. Kuboszek, A. Boczkowski. „Wykorzystanie metod komputerowych do oszacowania skuteczności redukcji hałasu na stanowiskach pracy.” *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji. Inżynieria Systemów Technicznych*, nr 2(11), 2015, s. 26-38.
- 10 A. Kuboszek, „Wspomaganie procesu projektowania zabezpieczeń akustycznych na stanowiskach pracy.” R. Knosala. (red.) *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, t.2. Opole: Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2015, s. 427-738.
- 11 A. Kulowski. „Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique,” *Applied Acoustics*, No 18, 1985.

- 12 E. Meyer. „Reverberation and Absorption of Sound.” *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 8, Issue 3, 1937.
- 13 D. Mleczek. „Analiza niepewności w modelowaniu akustycznym wnętrza.” Praca doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Kraków, 2013.
- 14 S. Pelzer, L. Aspöck, D. Schröder, M. Vorländer. „Interactive Real-Time Simulation and Auralization for Modifiable Rooms.” *Building Acoustics*, 1(21), 2014, p. 065-074.
- 15 „PN-EN ISO 3746:1999. Akustyka - Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej Różdeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego. Metoda orientacyjna z zastosowaniem otaczającej powierzchni pomiarowej nad płaszczyzną odbijającą dźwięk.”
- 16 J. H. Rindel. „Room acoustic prediction modelling,” w: XXIII Encontro Da Sociedade Brasileira De Acústica, Salvador-Ba, 2010.
- 17 „Rocznik Statystyczny Przemysłu,” 2014. Pobrano z: http://stat.gov.pl/download/-gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5515/5/8/1/rocznik_statystyczny_-przemyslu.pdf [Dostęp: 26.05.2015].
- 18 F. Spandock. „Akustische Modellversuche.” *Annalen der Physik*, vol. 412, 1934.
- 19 G. Spencer, M. V. R. Murty. „General ray tracing Procedure,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 52, Issue 6, 1962, p. 672-678.
- 20 M. Vorlander. „Simulation of the transient and steady-state sound propagation.” *Journal of the Acoustical Society of America*, no 1(86), 1989.

ZASTOSOWANIE METOD SYMULACJI KOMPUTEROWEJ W BADANIACH HAŁASU PRZEMYSŁOWEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono przykłady wykorzystania komputerowych metod symulacji zjawisk akustycznych w pracach projektowych zmierzających do opracowania optymalnych sposobów ograniczenia hałasu na stanowisku pracy. Zastosowanie symulacji komputerowej daje możliwość opracowania strategii prac wyciszeniowych najkorzystniejszej pod kątem skuteczności akustycznej oraz opłacalności ekonomicznej.

Słowa kluczowe: hałas, metody symulacyjne, metody geometryczne

THE USE OF COMPUTER SIMULATION METHODS IN INDUSTRIAL NOISE RESEARCH

Abstract: This paper presents examples of using computer-based methods of acoustic simulation for optimal designing of noise reduction projects at the workplaces. Using of the acoustic simulations provides the opportunity to develop optimal strategies for noise reduction in terms of acoustic efficiency and cost-effectiveness.

Key words: noise, simulation methods, geometric methods

Dr inż. Artur KUBOSZEK
Politechnika Śląska
Wydział Organizacji i Zarządzania
Instytut Inżynierii Produkcji
ul. Roosevelta 26, 41-800 Zabrze
e-mail: Artur.Kuboszek@polsl.pl

Data przesłania artykułu do Redakcji: 01.07.2016
Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 22.07.2016