

TECHNICZNE ASPEKTY PROCESU REALIZACJI KOMPUTEROWYCH SYMULACJI ZJAWISK AKUSTYCZNYCH

Artur KUBOSZEK

Streszczenie: Działania zmierzające do ograniczenia nadmiernego hałasu na stanowisku pracy polegają na realizacji usystematyzowanego ciągu czynności, których wykonanie pozwoli zaprojektować rozwiązania akustyczne spełniające oczekiwania, tzn. zmniejszające hałas na stanowisku pracy do wartości mniejszych od dopuszczalnych przy minimalizacji kosztów tego rozwiązania. Jednym z etapów tej procedury jest wykonanie analizy symulacyjnej pola akustycznego w badanej przestrzeni przemysłowej. Wykonane prace praktyczne wykazały, że przeprowadzenie rzetelnych badań pola akustycznego metodami symulacyjnymi obejmować musi szereg działań. Działania te można podzielić na przygotowawcze, polegające na zebraniu danych wejściowych do symulacji, działania związane z prawidłowym przeprowadzeniem symulacji oraz działania umożliwiające prawidłowe wykorzystanie uzyskanych wyników symulacji. W niniejszym artykule przedstawione zostaną techniczne oraz pozatechniczne aspekty zastosowania symulacji komputerowej zjawisk akustycznych w działaniach zmierzających do ograniczenia nadmiernego hałasu.

Słowa kluczowe: hałas, metody symulacyjne, metody geometryczne, modelowanie pola akustycznego

1. Wstęp

Hałas w miejscu pracy człowieka jest nadal jednym z większych problemów cywilizacyjnych. Obok zanieczyszczenia powietrza i wody stanowi podstawową przyczynę chorób zawodowych. Nadmierny hałas jest też przyczyną braku właściwych warunków wypoczynku w miejscu zamieszkania człowieka. Pomimo faktu, iż w obecnej chwili głównym źródłem uciążliwości związanych z nadmiernym hałasem jest hałas komunikacyjny, hałas maszyn i urządzeń w miejscu pracy nadal jest problemem, którego rozwiązanie wymaga odpowiednich nakładów i środków. Działania zmierzające do ograniczenia nadmiernego hałasu na stanowisku pracy opisane zostały przez autora w szeregu publikacji [1-5]. W pracach tych przedstawiono procedurę, której realizacja pozwoli zaprojektować rozwiązania akustyczne spełniające oczekiwania. Jednym z etapów opisywanej procedury jest wykonanie analizy symulacyjnej pola akustycznego w badanej przestrzeni przemysłowej. W przypadku analiz symulacyjnych zjawisk akustycznych w przestrzeni zamkniętej, np. wewnątrz hal przemysłowych, stosowane są programy komputerowe wykorzystujące algorytmy obliczeniowe oparte o metody geometryczne analizy pola akustycznego, np.: Raynoise, Odeon Industrial. W przypadku przestrzeni otwartych symulacje komputerowe odbywać się mogą z zastosowaniem metody opisanej w normie PN-ISO 9613-2:2002 pt. „Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólne metody obliczeń”. Metoda ta wykorzystywana jest w większości programów komputerowych realizujących zadania z zakresu tworzenia strategicznych map

hałasu, tj.: CadnaA, Immi, LimaA, czy Sound-Plan. W niniejszym artykule przedstawione zostaną techniczne oraz pozatechniczne aspekty zastosowania symulacji komputerowej zjawisk akustycznych w działaniach zmierzających do ograniczenia nadmiernego hałasu.

2. Proces realizacji symulacji komputerowej zjawisk akustycznych

Przeprowadzenie symulacyjnych badań pola akustycznego w ramach działań zmierzających do ograniczenia hałasu musi poprzedzać szereg działań przygotowawczych [1, 3, 4]. Należą do nich m.in.:

- Wykonanie pomiarów akustycznych w przestrzeni hali produkcyjnej do celów porównawczych i kalibracyjnych.,
- Wykonanie pomiarów dźwięku generowanego przez maszyny i urządzenia oraz wyznaczenia poziomu mocy akustycznej źródeł.
- Przeprowadzenie pomiarów geometrycznych badanej przestrzeni itp.

Działania te dostarczają informacji potrzebnych do budowy modelu geometrycznego oraz akustycznego, natomiast wyniki pomiarów akustycznych posłużą do oceny poprawności wyników symulacji. Szczególną uwagę w czasie działań przygotowawczych należy zwrócić na kompletność danych wejściowych. Warto wiedzieć, już na etapie badań wstępnych, jakie rozwiązania przeciwhałasowe można zastosować w tym konkretnym przypadku oraz jakich wartości wyciszenia hałasu oczekuje inwestor. Z uwagi na problemy natury logistycznej warto dokładnie przemyśleć tryb realizacji zadania wstępnych i projektowych tak, aby przy jak najmniejszym nakładzie czasu pozyskać pełną wiedzę o badanym obiekcie i warunkach w nim panujących.

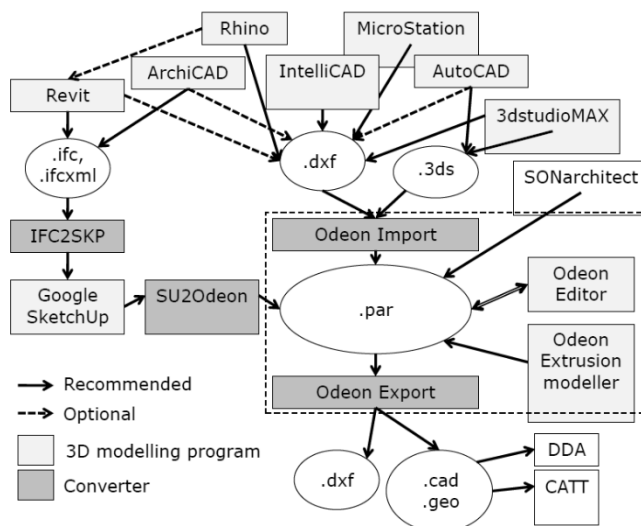
Realizacja badań symulacyjnych zjawisk akustycznych podzielić można na następujące grupy działań:

- Działania związane z budową modelu geometrycznego.
- Działania związane z budową modelu akustycznego.
- Działania związane z doбором parametrów symulacji komputerowej i przeprowadzenie symulacji.
- Działania związane z prezentacją wyników badań symulacyjnych.

2.1. Budowa modelu geometrycznego

Budowa modelu geometrycznego badanego obiektu jest procesem, wymagającym najwięcej pracy. Dokumentacja techniczna będąca w posiadaniu inwestora jest najczęściej niedostosowana do wymagań poprawnego utworzenia modelu geometrycznego. Zasoby inwestora obejmują zazwyczaj plany hal produkcyjnych wykonanych w formie rysunków CAD. Nierzadko jednak, w szczególności w przypadku starszych obiektów dokumentacja techniczna i budowlana występuje wyłącznie w wersji papierowych wydruków (!). W pierwszym przypadku uzyskane rysunki CAD zawierają zazwyczaj nadmiarową ilość informacji i tworzenie modelu geometrycznego polega na wyborze odpowiednich warstw, dokonywaniu pewnych uproszczeń i budowie modelu trójwymiarowego na podstawie warstw dwuwymiarowych. W drugim przypadku budowa modelu to żmudne odczytywanie wszystkich wymiarów z rysunku oraz posiłkowanie się danymi o trzecim wymiarze pozyskanymi w czasie przeprowadzonych obmiarów hali wraz z analizą wykonanych wtedy zdjęć.

Budowa modelu geometrycznego odbywać się może za pomocą narzędzi z grupy programów modelowani CAD i 3D. Powiązanie programu Odeon z aplikacjami graficznymi przedstawia rys. 1.



Rys.1. Powiązanie programu Odeon z aplikacjami graficznymi
Źródło: [6]

Budując model geometryczny wykorzystywany do symulacyjnej analizy zjawisk akustycznych należy uwzględnić kilka dodatkowych aspektów:

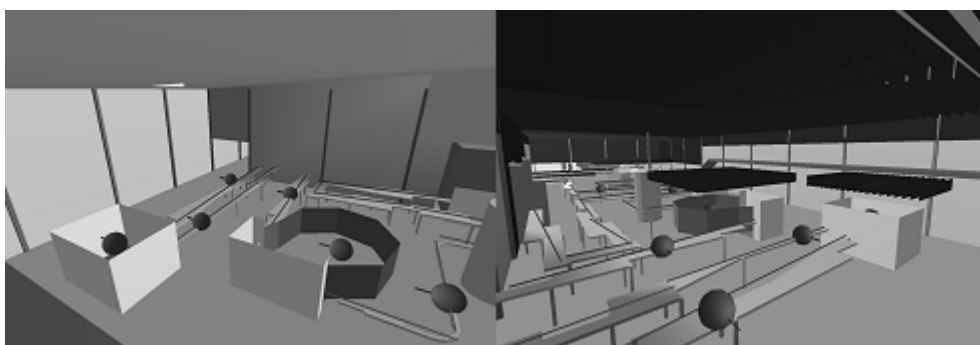
- Najistotniejszym z punktu widzenia dokładności oraz szybkości przeprowadzenia symulacji jest odpowiedni poziom szczegółowości modelu geometrycznego. Model bardzo szczegółowy, uwzględniający niewielkie detale konstrukcyjne jest z punktu widzenia akustyka całkowicie niepotrzebny. Małe detale o niewielkich powierzchniach nie mają wpływu na rozchodzenie się dźwięku i kształt pola akustycznego, natomiast z punktu widzenia metod geometrycznych stanowią powierzchnie odbijające, powodując znaczne wydłużenie obliczeń. Z drugiej strony model bardzo uproszczony, poprawny z punktu widzenia akustycznego, może być całkowicie nieatrakcyjny z punktu widzenia marketingowego. Mapy pola akustycznego, rysunki sytuacyjne, widoki poglądowe, stanowią nieodzowną część składową opracowania czy raportu z badań. Należy zadbać aby wyglądały one atrakcyjnie, przedstawiały rzeczywisty stan obiektu badanego oraz najważniejsze cechy konstrukcyjne i były łatwo rozpoznawalne (rys. 2). Należy w przypadku budowy modelu geometrycznego dokonać w pewnym sensie wyboru optymalnego stopnia uproszczeń modelu tak by pogodzić, sprzeczne niekiedy, opisane powyżej aspekty.
- Tworzenie modelu geometrycznego odbywa się w zewnętrznych aplikacjach CAD. Wynika to z faktu, że zaimplementowane w programach symulacyjnych narzędzia do tworzenia modelu geometrycznego mają bardzo ograniczone możliwości, a ich obsługa jest trudna i mało intuicyjna. Utworzony w programie zewnętrznym model jest następnie importowany do programu symulacyjnego poprzez np. format pliku



Rys. 2 Wygląd rzeczywistego obiektu przemysłowego i jego model geometryczny
 Źródło: opracowanie własne

*.dxf. Oznacza to, że jakkolwiek ingerencja w geometrię tworzonego modelu powoduje konieczność ponownego importu modelu do programu symulacyjnego i przeprowadzenie procedury budowy modelu akustycznego zazwyczaj od początku. Budując model geometryczny należy więc, o ile to możliwe już na samym początku wprowadzić do modelu wszelkie obiekty, które stanowią przewidywane środki ograniczające hałas takie, jak ekrany akustyczne, dodatkowe elementy pochłaniające itp. (rys. 3). Wykonanie kompletnego modelu geometrycznego pozwala wykonać proces importu i budowy modelu akustycznego tylko raz.

- Z uwagi na to, że programy symulacyjne wykorzystujące metody geometryczne ograniczone są do badania zamkniętych przestrzeni, budując model geometryczny należy zwrócić szczególną uwagę na dokładność wykonania modelu. Model nie może „przeciekać”, odpowiednie powierzchnie ograniczające muszą precyzyjnie się stykać bez żadnych szczelin. W sytuacji, gdy w modelu mają pojawić się otwory (otwarte okna, drzwi, bramy, otwarte wiaty), elementy takie należy zamodelować powierzchniami, którym w procesie budowy modelu akustycznego przypisany zostanie współczynnik pochłaniania równy 1. Promienie dźwięku padające na taką powierzchnię ulegną całkowitemu pochłonięciu, co „zasymuluje” sytuację ucieczki części hałasu na zewnątrz.



Rys. 3. Model geometryczny hali z wyłączonymi i włączonymi dodatkowymi elementami pochłaniającymi
 Źródło: opracowanie własne

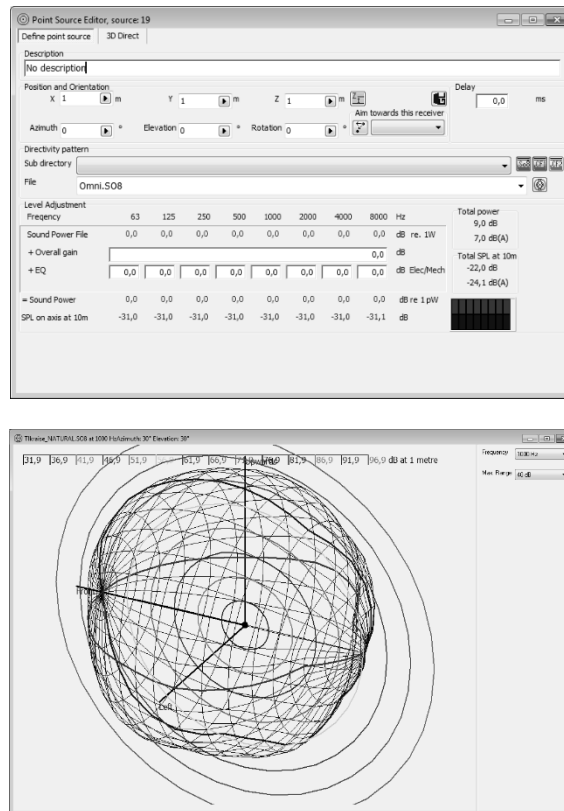
2.2. Budowa modelu akustycznego

Model geometryczny po zaimportowaniu do programu symulacyjnego podlega przekształceniu w model akustyczny. Proces ten podzielić można na trzy grupy działań:

- Przypisanie powierzchniom modelu parametrów akustycznych. Poszczególnym powierzchniom przypisane zostają własności akustyczne takie jak współczynnik pochłaniania i, w niektórych przypadkach, również współczynnik rozproszenia i przenoszenia dźwięku. Dobór odpowiednich wartości tych parametrów możliwy jest o ile dokonano szczegółowej analizy zastosowanych w badanym pomieszczeniu materiałów. Dane o wielkości wybranych parametrów akustycznych powierzchni można z wewnętrznej bazy oprogramowania symulacyjnego lub ze źródeł zewnętrznych. Program komputerowy Odeon przywoływany w niniejszym artykule w swojej wewnętrznej bazie danych przechowuje informację o 180 różnych materiałach do wyboru. Dodatkowo wartości te nie zawsze odpowiadają wartościom odpowiednich współczynników rzeczywistych materiałów wykorzystywanych w badanym obiekcie. Dlatego też właściwym jest poszukiwanie się dostępnymi badaniami własności akustycznych materiałów, dostępnymi danymi literaturowymi i zbudowanie bazy materiałów dedykowanej dla rozpatrywanego przypadku.
- Wprowadzenie do modelu akustycznego źródeł dźwięku. Poprawne wprowadzenie modeli źródeł dźwięku ma chyba największe znaczenie dla uzyskania poprawnych wyników symulacji komputerowej. Wprowadzenie źródła dźwięku do modelu polega na wyborze szeregu parametrów to źródła opisujących tj.:
 - rodzaj źródła (punktowe, liniowe, powierzchniowe),
 - położenie źródła w badanej przestrzeni (współrzędnych źródła),
 - modelu kierunkowości źródła [7],
 - poziomu mocy akustycznej (rys. 4.).Dane powyższe pochodzić mogą z udostępnionej dokumentacji technicznej urządzeń stanowiących źródła dźwięku lub z przeprowadzonych wcześniej pomiarów akustycznych i obliczeń. W obu przypadkach poziomy mocy akustycznej źródeł muszą zostać przetworzone do postaci akceptowanej przez program symulacyjny. Jest to duże utrudnienie z uwagi na daleko idącą niejednoznaczność opisu parametrów wejściowych źródeł hałasu w programach komputerowej symulacji zjawisk akustycznych.
- Wprowadzenie do modelu obliczeniowego odbiorników dźwięku. Wybór sposobu uzyskania wyników obliczeń symulacyjnych zależy generalnie od celu przeprowadzenia symulacji. Wyróżnia się dwa sposoby wprowadzenia odbiorników dźwięku do modelu symulacyjnego:
 - Za pomocą pojedynczych, wyizolowanych punkty (ang. receivers) reprezentujących np. istniejące punkty pomiarowe. Zastosowanie punktów odbiorczych umożliwia uzyskanie dokładnych wyników symulacji przy dosyć krótkim czasie obliczeń
 - Za pomocą siatki odbiorczej (ang. receiver grid) umożliwiającej generowanie mapy pola akustycznego. Zastosowanie siatki odbiorczej wydłuża zdecydowanie czas obliczeń.

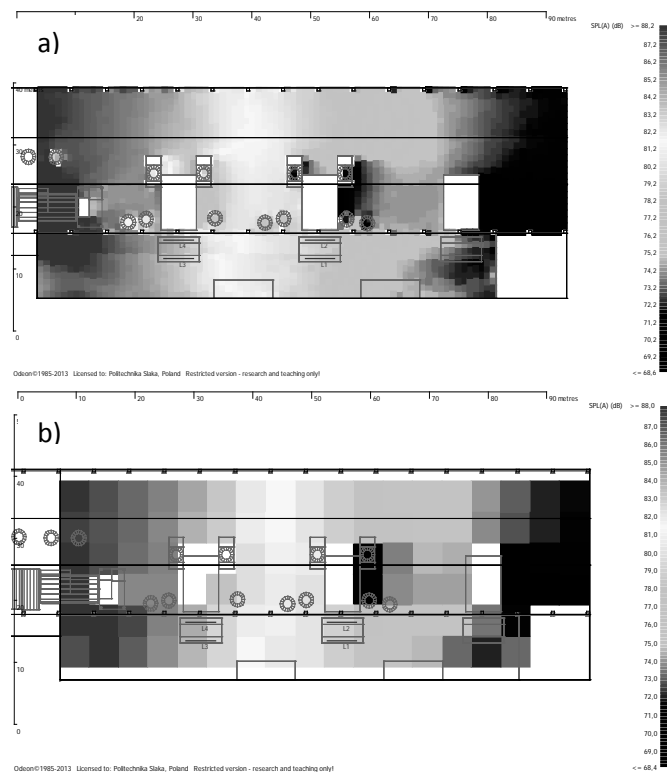
Wydłużenie czasu obliczeń wynika z faktu, iż siatka odbiorcza jest reprezentowana w modelu za pomocą szeregu punktów odbiorczych znajdujących się w punktach węzłowych siatki. Zmniejszenie odległości pomiędzy węzłami siatki odbiorczej w

wyraźny sposób poprawia „wygląd” otrzymanej mapy akustycznej, natomiast wielokrotnie zwiększa czas obliczeń. Rys. 5 przedstawia fragment mapy akustycznej uzyskanej przy odległości 1 m pomiędzy punktami siatki (rys. 5a) oraz przy odległości 5 m (rys. 5b).



Rys. 4. Sposób wprowadzania punkowego źródła dźwięku i określenia kierunkowości źródła dźwięku
Źródło: opracowanie własne

Przy zastosowaniu dokładnie takich samych parametrów obliczeń (ilości promieni, ilości odbić itd), w pierwszym przypadku obliczenia trwały około 30 minut, w drugim około 1 minuty. Takí wzrost czasu obliczeń wydaje się naturalny, jeśli zauważymy, że siatka z odległością 1m reprezentowana jest przez 3060 punktów natomiast siatka 5 m odpowiednio składa się ze 108 punktów odbiorczych. Dobór właściwej „gęstości” siatki odbiorczej jest uzależniony w głównej mierze od przeznaczenia wykonywanej mapy akustycznej. Mapa przeznaczona do szczegółowych analiz rozchodzenia się dźwięku w badanej przestrzeni wymaga większej dokładności, co związane jest z większą gęstością siatki. Mapa akustyczna, która ma mieć charakter wyłącznie poglądowy może być wykonana z mniejszą dokładnością.



Rys. 5. Przykładowa mapa akustyczna uzyskana dla dwóch wartości odległości pomiędzy punktami węzłowymi siatki, a – odległość 1m, b – odległość 5m

Źródło: opracowanie własne

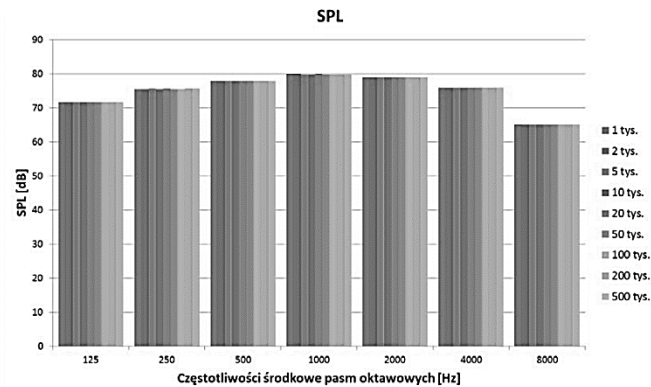
2.3. Przeprowadzenie symulacji komputerowej

Poprawne przeprowadzenie symulacji komputerowej wymaga przede wszystkim ustalenia szeregu parametrów obliczeń takich jak:

- Symulowana wilgotność i temperatura powietrza.
- Ilość promieni dźwięku generowanych przez źródło.
- Maksymalny czas propagacji promienia.
- Maksymalna ilość odbić promienia dźwięku od powierzchni odbijających.

Analizy przedstawione w [7, 8] wykazują że parametrem o największym wpływie na czas obliczeń jest ilość promieni generowanych z źródła dźwięku. Badania przedstawione w [7] 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 uzyskane wyniki obliczeń (rys. 6). Przykład przedstawiony w [8] wykazał natomiast pewny niewielki wpływ ilości promieni dźwięku na niektóre (EDT, T_{30}) uzyskane wyniki symulacji.

Planując przeprowadzenie badań symulacyjnych zjawisk akustycznych należy wziąć pod uwagę fakt, że uzyskanie prawidłowych wyników obliczeń wymaga przeprowadzenia wielokrotnie tej samej procedury obliczeniowej. Wyniki uzyskane w pierwszej procedurze obliczeniowej różnią się zazwyczaj od wartości uzyskanych w badanej przestrzeni w czasie

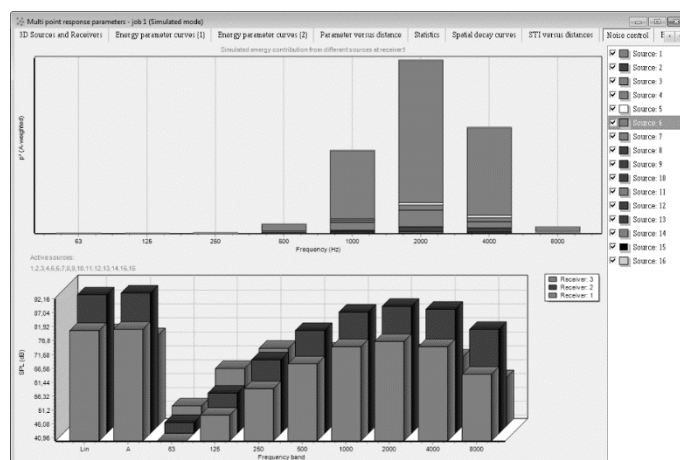


Rys. 6. Wpływ ilości promieni generowanych ze źródła dźwięku na parametr SPL w przypadku obiektu o niewielkich rozmiarach
Źródło: [7]

pomiarów wstępnych. Z tego też powodu dokonuje się tzw. kalibracji modelu polegającej na takiej modyfikacji parametrów akustycznych modelu, zazwyczaj poziomu mocy akustycznej źródeł, aby uzyskać w wybranych punktach wartości odpowiadające wartościom uzyskanym z pomiarów akustycznych. Procedurę tę można zrealizować wielokrotnie, do uzyskania zadawalających efektów. Konieczność przeprowadzenia kalibracji powoduje, że czas, jaki należy poświęcić na uzyskanie optymalnych wyników symulacji, wydłuża się. Z tego też powodu do przeprowadzenia kalibracji modelu bardziej nadają się punktowe odbiorniki dźwięku, w przypadku których czas obliczeń jest zdecydowanie krótszy. Proces kalibracji modelu jest procedurą, którą należy zaplanować już na etapie badań przygotowawczych. Wykonując pomiary akustyczne w badanej przestrzeni należy uwzględnić konieczność przeprowadzenia pomiarów w dodatkowych punktach pomiarowych, niezwiązanych ze źródłami dźwięku i stanowiskami pracy człowieka, które posłużą tylko do celów kalibracyjnych.

2.4. Prezentacja wyników symulacji komputerowej

Wyniki symulacji komputerowej zjawisk akustycznych prezentowane mogą być w wielorakiej formie. W zależności od celu realizacji badań symulacyjnych, mogą to być mapy pola akustycznego (rys. 5) przedstawiające rozkład wybranych parametrów akustycznych w badanej przestrzeni ale również wartości liczbowe prezentowane w formie graficznej (za pomocą wykresu) (rys. 7) lub tabelarycznej.



Rys. 7. Graficzna forma prezentacji wartości uzyskanych w wyniku przeprowadzenia symulacji zjawisk akustycznych
 Źródło: opracowanie własne

3. Podsumowanie

Hałas w halach przemysłowych jest wynikiem działania maszyn i urządzeń produkcyjnych, środków transportu wewnętrznego, urządzeń wentylacyjnych i innych. Duża liczba źródeł rozmieszczona na niekiedy dużej powierzchni hali produkcyjnej, ich wzajemne powiązanie funkcjonalne czy złożoność konstrukcyjna hali to czynniki, które powodują, że niemożliwe jest określenie, jaki jest wpływ emisji hałasu przez poszczególne urządzenia na pracowników. Metody pomiarowe nie dają niestety odpowiedzi, jaki jest precyzyjny związek pomiędzy parametrami poszczególnych źródeł hałasu, a wartościami poziomu hałasu w miejscu pracy człowieka. Określenie wpływu poszczególnych źródeł hałasu na badaną przestrzeń jest praktycznie niemożliwe metodami pomiarowymi.

Niemożliwe jest również dokładne oszacowanie skuteczności proponowanych rozwiązań przeciwhałasowych. Informacja o skuteczności proponowanych rozwiązań powinna być znana już na etapie projektowania tych środków. Niedopuszczalna jest sytuacja, w której to czy proponowane rozwiązanie spełnia zakładane wymogi (np. obniża hałas emitowany przez źródło) stwierdzamy dopiero po jego wdrożeniu. Rozwiązania przeciwhałasowe są rozwiązaniami kosztownymi i ryzyko realizacji rozwiązania niespełniającego wymagań inwestora powinno być zminimalizowane

Rozwiązanie powyższych problemów możliwe jest z wykorzystaniem komputerowych systemów symulacji zjawisk akustycznych. Analiza rozchodzenia się dźwięku w badanym obiekcie metodą symulacyjną daje możliwość dowolnego analizowania pola akustycznego. Istnieje możliwość dowolnego kształtowania geometrii przestrzeni badawczej, określenia parametrów i położenia źródeł hałasu, umiejscowienia punktów reprezentujących położenie pracowników narażonych na hałas. Systemy komputerowej symulacji zjawisk akustycznych dają również możliwość analizy skuteczności wprowadzanych rozwiązań przeciwhałasowych. Wykonywanie tego typu badań w środowisku modelu komputerowego powoduje, że możliwe jest praktycznie dowolne kształtowanie przestrzeni modelu i wprowadzanie dowolnej ilości rozwiązań przeciwhałasowych. To, że odbywa się to wyłącznie na etapie symulacji komputerowej powoduje, że metodą kolejnych modyfikacji

modelu symulacyjnego można uzyskać rozwiązanie optymalne - pod kątem akustycznym i ekonomicznym.

Artykuł powstał w ramach pracy statutowej 13/030/BK_17/0027 pt. "Sposoby i środki doskonalenia produktów i usług na wybranych przykładach" realizowanej w Instytucie Inżynierii Produkcji na Wydziale Organizacji i Zarządzania.

Literatura

1. Kuboszek A. i Boczkowski A., „Techniczne i pozatechniczne aspekty wdrażania innowacyjnych metod projektowania zabezpieczeń przeciwhałasowych w przemyśle. Etap I. Ekspertyza akustyczna.” w Zarządzanie innowacjami w produkcji i usługach. Monografia., J. Kaźmierczak i J. Bartnicka, Redaktorzy, Opole, Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2014, pp. 15-36.
2. Kuboszek A. i Boczkowski A., „Techniczne i pozatechniczne aspekty wdrażania innowacyjnych metod projektowania zabezpieczeń przeciwhałasowych w przemyśle. Etap II. Projekt akustyczny,” w Zarządzanie innowacjami w produkcji i usługach. Monografia, J. Kaźmierczak i J. Bartnicka, Redaktorzy, Opole, Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2014, pp. 35-48.
3. Boczkowski A., „Komputerowe wspomaganie w procesie realizacji ocen oddziaływania akustycznego zakładów przemysłowych na środowisko.” w Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. T. 2., R. Knosala, Red., Opole, Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2015, pp. 372-383.
4. Kuboszek A., „Wspomaganie procesu projektowania zabezpieczeń akustycznych na stanowiskach pracy,” w Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. T. 2., R. Knosala, Red., Opole, Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2015, pp. 427-738.
5. Kuboszek A. i Boczkowski A., „Wykorzystanie metod komputerowych do oszacowania skuteczności redukcji hałasu na stanowiskach pracy.” Inżynieria Systemów Technicznych, nr 2 (11), pp. 26-38, 2015.
6. Christensen L., Koutsouris G., ODEON ROOM ACOUSTICS SOFTWARE Version 12 User manual, Lyngby : ODEON A/S, 2013.
7. Mleczko D., „Analiza niepewności w modelowaniu akustycznym wewnątrz, Praca doktorska,” Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Katedra Mechaniki i Wibroakustyki., Kraków, 2013.
8. Rindel J. H., „Room scoustic prdiction modelling,” w XXIII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, SALVADOR-BA, 2010.

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