



Andrzej BŁAŻEJEWSKI

METODYKA OPTYMALIZACJI WARUNKÓW BRZEGOWYCH OBSZARU ZAMKNIĘTEGO Z ZABURZENIEM WIBROAKUSTYCZNYM W ZAKRESIE NISKICH CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie

W pracy omówiona została metodyka optymalizacji warunków brzegowych obszaru zamkniętego, który w warunkach rzeczywistych może być kabiną pojazdu, pomieszczeniem technicznym lub innym przedziałem roboczym. Jeżeli wewnątrz tego obszaru założyć istnienie źródła zaburzeń wibroakustycznych, jakim może być element czynny taki jak silnik, drgający element konstrukcji lub inny przedmiot wibrujący, to wewnątrz tego obszaru wygenerowane zostanie pole akustyczne. Część fali zaburzeń generowanej przez źródło pochłaniana jest przez brzegi obszaru. Postawiono pytanie, jakie powinny być warunki brzegowe, aby wewnątrz obszaru uzyskać pożądaną poziom pola wibroakustycznego? W pracy przedstawiono metodę modelowania pola w pewnych warunkach, metody umożliwiające eliminowanie czynników niewpływających w sposób istotny na generowane pole, a więc nieistotne w procesie optymalizacji oraz bezpośrednią metodę optymalizacji. Odpowiednie zestawienie tych metod pozwoli uzyskać odpowiednią konfigurację warunków brzegowych ze względu na przyjęte kryteria.

WSTĘP

Synteza wibroakustyczna, jedno z czterech głównych zadań wibroakustyki, zawiera w sobie modele i modelowanie wibroakustyczne prowadzące do sterowania energią wibroakustyczną z jednej strony oraz redukcję hałasu i wibracji z drugiej. Sterowanie energią wibroakustyczną, sprowadza się do sterowania parametrami pola akustycznego. Prowadzi to do użytecznego celu, jakim jest obniżenie poziomu zakłóceń wibroakustycznych maszyn, urządzeń, instalacji wpływających na środowiska ich pracy. Poziomą redukcji to minimum możliwe do osiągnięcia na danym etapie wiedzy i technologii lub wynikające z innych założeń np. optymalizacji. Pod pojęciem zakłóceń należy rozumieć niepożądane składowe, wartości lub poziomy parametrów pola wibroakustycznego (akustycznego). Model fizyczny procesu wibroakustycznego można przedstawić w postaci dwóch podsystemów połączonych więzami [8, 9, 10, 16]. W pierwszym podsystemie („źródło pierwotne”) występują procesy powodujące powstanie drgań mechanicznych, które poprzez więzy przenoszą się do drugiego podsystemu-objektu („źródło wtórne”). W drugim podsystemie-objekcie, drgania te mogą mieć postać np. drgań akustycznych, których działanie należy zmniejszyć lub kształtować w inny sposób. Czasami rozważanym podsystemem-objektem jest pewna przestrzeń

ograniczona wokół maszyny lub urządzenia, tworząca z nim nierozzerwalną całość (pomieszczenia, hale ze stanowiskami roboczymi, itp.). Jeżeli zmiennymi wyjściowymi pozostającymi w rozważaniach są tylko funkcje opisujące drgania akustyczne w postaci fal tworzących określone pole w badanej przestrzeni, to mamy do czynienia z zagadnieniem akustyki.

Każde urządzenie lub maszyna może być, zatem „źródłem wtórnym” drgań mechanicznych i jednocześnie akustycznych. Te ostatnie nazywane są „hałasem”. Od wartości poziomów zmiennych wyjściowych zależy, które z nich stanowią większy problem w danych warunkach technologicznych, środowiskowych lub społecznych. Ze względu na wspomniane powyżej fizyczne przyczyny generowania sygnałów wibroakustycznych, źródła można podzielić na [8, 9, 10, 16]: mechaniczne, elektryczne (elektromagnetyczne), aero- i hydrodynamiczne oraz technologiczne. Najczęściej jeden obiekt jest generatorem energii wibroakustycznej o różnorodnych źródłach. Należy wówczas zidentyfikować, które z nich generują najwyższy poziom energii oraz częstotliwości (harmoniczne), które mogą być najbardziej niebezpieczne lub niepożądane. Po zidentyfikowaniu tych parametrów można wybrać metodę minimalizacji wyżej wymienionych zagrożeń. Jednym ze sposobów jest odpowiednia modyfikacja warunków brzegowych. Następujące działania: wybór metody modelowania (budowa modelu matematycznego), określenie i wyznaczenie czynników wejściowych (impedancja powierzchni) oraz wyjściowych (wartości pola wibroakustycznego), określenie istotności czynników wejściowych i sformułowanie problemu oraz wybór metody optymalizacji.

1. MODEL MATEMATYCZNY – METODA ANALIZY MODALNEJ

Jedną z metod opisu pola akustycznego zakłada wykorzystanie założeń analizy modalnej. W pewnych warunkach, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości źródła, jest to metoda szczególnie przydatna ze względu na szybkość działania modelu modalnego oraz jego prostotę. Jak wynika z poprzedniego rozdziału, wiele typów źródeł wibroakustycznych można modelować w pewnych warunkach, jako źródła harmoniczne. W przypadku umieszczenia w obszarze zamkniętym harmonicznego źródła dźwięku, rozkład pola akustycznego opisuje funkcja $p = p(x, y, z, t)$ będąca rozwiązaniem równania falowego w postaci:

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = q e^{j\omega t} \quad (1)$$

gdzie: c to prędkość propagacji fali akustycznej w powietrzu, q funkcja definiująca źródło oraz jego położenie, a symbol $\Delta \equiv \nabla^2$. Źródło zaburzeń wibroakustycznych charakteryzuje częstość $\omega = 2\pi f$ oraz funkcja q proporcjonalna do jego wydajności w $[kg/s^2 \cdot m^3]$ lub mocy w $[W]$ oraz położenia (rozmieszczenia) wewnątrz obszaru zamkniętego. Funkcja $p(x, y, z, t)$ spełnia jednocześnie warunki początkowe dla $t = 0$, $p = 0$ oraz $\partial p / \partial t = 0$. Zgodnie z założeniami analizy modalnej, rozwiązanie równania (1) może być przedstawione w postaci sumy szeregu [15,11,21,27]:

$$p(x, y, z, t) = \sqrt{V} \sum_{n=0}^{\infty} P_n(t) \Psi_n(x, y, z) \quad (2)$$

gdzie: V to objętość obszaru, a funkcje $P_n(t)$, przy danej częstotliwości f harmonicznego źródła, reprezentują zmiany w czasie ciśnienia akustycznego. W przypadku równania falowego (1) będzie to przebieg narastania dźwięku lub po pewnym czasie, stan ustalony [27]. W równaniu (2) funkcje Ψ_n , to funkcje własne (mody akustyczne) obszaru. W świetle poczynionych w pracach Dowella, Gormana i Smitha [9] założeń, tak rozpatrywany obszar zamknięty stanowi układ rezonansowy o charakterystycznych funkcjach własnych Ψ_n oraz związanych z nimi częstościach własnych ω_n . Funkcje własne spełniają równanie Helmholtza w postaci:

$$\Delta\Psi_n(r) + \frac{\omega_n^2}{c^2}\Psi_n(r) = 0 \quad (3)$$

przy zerowych warunkach brzegowych Neumanna $\partial\Psi_n/\partial n=0$ [15, 27]. Operator $\partial/\partial n$ oznacza pochodną funkcji w kierunku prostopadłym do brzegu obszaru. Funkcje $P_n(t)$ wyznacza się stosując wzór Greena:

$$\int_V (p\Delta\Psi_n - \Psi_n\Delta p)dV = \int_S (p\frac{\partial\Psi_n}{\partial n} - \Psi_n\frac{\partial p}{\partial n})dS \quad (4)$$

gdzie: S jest powierzchnią ograniczającą rozpatrywany obszar o niezerowych impedancyjnych warunkach brzegowych Neumanna w postaci [15, 27]:

$$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{1}{Z_s}\frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

gdzie: ρ_0 jest gęstością powietrza, a Z_s to powierzchniowa impedancja akustyczna. Przy powyższych założeniach można wyprowadzić uproszczony model pola akustycznego oparty na tzw. amplitudach modalnych A_n , które w stanie ustalonym przyjmują postać [3]:

$$P_n = A_n e^{j\omega t} = \frac{-\frac{c^2}{\sqrt{V}}q\Psi_{n0} - j\omega\rho_0 c^2 \delta_{nm} \sum_{m=0}^{\infty} A_m \int_S \frac{\Psi_m \Psi_n}{Z_s} dS}{\omega_n^2 - \omega^2 + j\omega\rho_0 c^2 \int_S \frac{\Psi_n^2}{Z_s} dS} e^{j\omega t} \quad (6)$$

gdzie: $\delta_{nm}=1$ gdy $m \neq n$ oraz $\delta_{nm}=0$ gdy $n=m$, Ψ_{n0} oznacza wartość funkcji własnej w punkcie usytuowania źródła. Całki w zależności (6) opisują oddziaływanie związane z istnieniem impedancyjnych warunków brzegowych.

1.1. Zakres stosowania modelu

Istotnym problemem w analizie i modelowaniu pola wibroakustycznego obszarów zamkniętych jest określenie zakresu rozpatrywanych częstotliwości. Determinuje to możliwości zastosowania odpowiedniego aparatu matematycznego do opisu pola. Można wyznaczyć dwa zasadnicze zakresy. Pierwszy, w którym pole akustyczne charakteryzuje się wyraźnie odseparowanymi modami oraz drugi, w którym mody leżą stosunkowo blisko siebie i „nakładając się” powodują spłaszczenie i wygładzenie odpowiedzi częstotliwościowej. Wyznaczenie tej granicy determinuje m.in. możliwość wykorzystania metody predykcji i modelowania pola akustycznego w obszarze z zastosowaniem metody elementów skończonych (ang. FEM) lub elementów brzegowych (ang. BEM), albo konieczność stosowania metod stochastycznych lub energetycznych. Zgodnie z założeniami Schroedera, częstotliwość graniczną f_{gr} opisuje następująca formuła [32]:

$$f_{gr} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (7)$$

Potwierdzenie teoretyczne oraz eksperymentalne istnienia granicy możliwości deterministycznego zakresu przewidywania kształtu pola akustycznego wewnątrz obszaru dostarczył w swojej pracy Doak [13]. W tym też zakresie tj. do częstotliwości granicznej model modalny może być stosowany. Kolejnym problemem jest określenie liczby częstotliwości własnych, a tym samym liczby modów (funkcji własnych), które są istotne w sumie szeregu (2). Wtedy jest on szeregiem skończonym i obliczenie jego sumy jest proste. Jak wynika z zależności (6) przy rozpatrywaniu źródeł o charakterze harmonicznym, wartości istotne amplitud modalnych, wpływające na wartości pola akustycznego to amplitudy odpowiadające częstotliwością własnym stosunkowo bliskim częstotliwości źródła. Poza tym zakresem wartości amplitud modalnych szybko maleją do zera.

2. WYZNACZANIE WARTOŚCI POŁA WIBROAKUSTYCZNEGO

Na podstawie przyjętego modelu matematycznego, aby wyznaczyć wartości pola akustycznego stosując zależność (2), konieczne jest wyznaczenie wartości funkcji własnych i częstotliwości własnych danego obszaru oraz amplitud modalnych (6), które z kolei można obliczyć wtedy, gdy znane są całki będące tzw. współczynnikami tłumienia.

2.1. Funkcje i częstotliwości własne obszaru

Wartości funkcji własnych oraz częstotliwości własnych wyznacza się rozwiązując zagadnienie własne dla obszaru zamkniętego zdefiniowane zależnością (3) dla brzegów doskonale sztywnych tj. odbijających falę akustyczną bez jej pochłaniania. W przypadku niektórych regularnych kształtów obszarów znane są analityczne rozwiązania problemu własnego, które można bezpośrednio zastosować do obliczania wartości amplitud modalnych. Wyznaczanie funkcji własnych obszarów nieregularnych przy wykorzystaniu znanych funkcji obszarów regularnych, które można odpowiednio rozmieścić w ich wnętrzu opisano w pracach [1, 29, 30]. Jednak najbardziej znane i najczęściej stosowane są metody numeryczne takie jak metoda elementów skończonych czy metoda elementów brzegowych. Pracochłonność uzyskania rozwiązania zależy od rozpatrywanego zakresu częstotliwości (częstotliwość graniczna f_{gr}), co wiąże się bezpośrednio z liczbą koniecznych do uzyskania funkcji i częstotliwości własnych. Liczba ta rośnie z trzecią potęgą górnej rozpatrywanej częstotliwości [23 str. 337]. Po uzyskaniu rozwiązania w postaci częstotliwości i funkcji własnych konieczna jest ich normalizacja. Zakłada się, że ortogonalność jest zawsze zachowana przy użyciu wyżej wymienionych metod. Należy tak dokonać normalizacji funkcji, aby spełniony był warunek:

$$\int_V \Psi_n \Psi_m dV = \begin{cases} 0 & n \neq m \\ 1 & n = m \end{cases} \quad (8)$$

2.2. Współczynniki tłumienia i sprzężenia

Aby jednoznacznie wyznaczyć wartości amplitud modalnych (6) należy znać wartości całek określających wpływ impedancyjnych warunków brzegowych na układ. Pierwsza z nich występująca w mianowniku, tj. współczynnik tłumienia [3, 27] wpływa na redukcję wartości amplitud modalnych. Natomiast całka w liczniku nazywana jest współczynnikiem sprzężenia między modami, które powstaje na skutek impedancyjnych warunków brzegowych [3, 27]. Współczynniki te można zapisać w postaci:

$$r_n = \rho_0 \cdot c^2 \int_S \frac{\Psi_n^2}{Z_S} ds \quad (9)$$

$$r_{mn} = \rho_0 \cdot c^2 \int_S \frac{\Psi_m \Psi_n}{Z_S} ds \quad (10)$$

Jak wykazali Franzoni i Bliss [2] przy założeniu, że impedancja Z_S jest na tyle duża, że $Z_S / \rho_0 c \gg 1$, efekt sprzężenia modów może być w tym przypadku pominięty. Jeżeli w równaniu (6) pominiemy sprzężenie między modami wynikające w impedancyjnych warunków brzegowych (5), równanie to dla każdego modu można opisać następującą uproszczoną zależnością [3, 27]:

$$A_n = \frac{-\frac{c^2}{\sqrt{V}} q \Psi_{n0}}{\omega_n^2 - \omega^2 + j\omega \rho_0 c^2 \int_S \frac{\Psi_n^2}{Z_S} dS} \quad (11)$$

Wyznaczając wartości amplitud modalnych należy wziąć pod uwagę następujące problemy:

1. Podział całej powierzchni ograniczającej obszar na elementy o różnej impedancji. Należy określić poszczególne części lub elementy s_i całej powierzchni brzegowej S ograniczającej, które będą charakteryzowały się specyficzną impedancją powierzchniową Z_{Si} . Podział ten zdeterminuje konieczność wyznaczenia wartości funkcji własnych na elementach s_i .
2. Metoda obliczania całek (9) i (10), która zależy również od metody wyznaczania funkcji własnych, może być analityczna lub numeryczna.
3. Założenie zakresu zmienności impedancji powierzchniowej wiąże się z dwoma aspektami. Pierwszy, to możliwość zastosowania modelu bez sprzężenia modów w przypadku stosunkowo dużych wartości impedancji szczególnie, gdy można założyć, że jest to impedancja „czysto” rzeczywista. Kiedy impedancja przyjmuje małe wartości należy przyjąć model ze sprzężeniem. Podobnie, gdy zakładamy zespolone impedancyjne warunki brzegowe. W tym przypadku dodatkowo należy wybrać odpowiedni model, który uzależnia impedancję powierzchniową od grubości warstwy [12, 20, 25] materiału absorpcyjnego.

3. BADANIE ISTOTNOŚCI – PROGRAMY STATYSTYCZNE

Z zależności (6) oraz (11) wynika, że powierzchnie brzegowe obszaru mają zróżnicowany wpływ na pole akustyczne wnętrza. W przypadku obszarów o złożonym kształcie i dużej liczbie powierzchni ograniczających możliwe jest, że jedne powierzchnie s_i mogą mieć zdecydowanie większy wpływ na pole akustyczne niż pozostałe. Zbadanie wszystkich możliwych konfiguracji impedancji takiego obszaru jest praktycznie niemożliwe lub przynajmniej bardzo czasochłonne i wymagają dużej liczby doświadczeń. W takich przypadkach można wykorzystać metody umożliwiające, zminimalizowanie tej liczby i statystyczne wnioskowanie o istotności wpływu powierzchni na wartości pola akustycznego. Jednym ze sposobów są procedury stosowane w badaniach „odporności metod badawczych” (*ang. robustness tests*) [26, 33], a w szczególności metody badań rozpoznawczych [19, 22, 24]. Liczba doświadczeń zależna jest od liczby badanych czynników, co w rozpatrywanym przypadku oznacza liczbę powierzchni, na których dopuszczalna jest zmiana impedancji. Określana jest ona na podstawie tzw. programów statystycznych. Następnie badany jest efekt działania każdego czynnika wejściowego. W tym przypadku czynnikami tymi są wartości impedancji powierzchni, z założonego zakresu (najczęściej wartości skrajne i środkowe), wpływające na czynnik wyjściowy, czyli wartości pola akustycznego. Następnie wyniki poddaje się interpretacji poprzez porównanie ich z wartościami krytycznymi otrzymywanymi na podstawie testów statystycznych, przy założonym poziomie istotności α .

Ze względu na możliwą dużą liczbę czynników wejściowych program Placketta-Burmana [7, 24], który jest częściowym (ułamkowym, frakcyjnym) planem dwupoziomowym jest efektywny. Przy założeniu, że wartości impedancji zmieniają się na dwóch poziomach, w zakresie od Z_{min} do Z_{max} , czynnikiem wyjściowym, reprezentującym poziom ciśnienia akustycznego pola w całej przestrzeni obszaru V , dla danego usytuowania harmonicznego źródła dźwięku o danym wydatku lub mocy, jest wartość średnio kwadratowa p_{rms} opisana zależnością:

$$p_{rms} = \sqrt{\int_V \frac{p^2}{V} dV} \quad (12)$$

W przypadku proponowanego modelu modalnego, wykorzystując ortogonalność funkcji własnych Ψ_n możemy wartość średnio kwadratową zapisać w następującej prostej postaci:

$$p_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^N A_n^2} \quad (13)$$

W programie Placketta-Burmana minimalna liczba doświadczeń N , przy której można wnioskować statystycznie o istotności „ i ” czynników wejściowych wynosi $N=i+1$, a nie 2^i , jak w przypadku planów całkowitych. Przy tej liczbie doświadczeń nie występują tzw. czynniki fikcyjne [19, 22, 24]. Nie można ich, zatem użyć do oszacowania błędu standardowego efektów wpływu czynników wejściowych, a tym samym wyznaczyć efektu krytycznego E_{kryt} będącego granicą istotności. Efekt krytyczny określa się wtedy na podstawie tylko czynników rzeczywistych. Efekt E_i działania każdego czynnika „ i ”, czyli wpływu impedancji danej powierzchni s_i na pole akustyczne (p_{rms}), określa się zgodnie z zależnością:

$$E_i = \frac{\sum p_{rms}(+)}{N/2} - \frac{\sum p_{rms}(-)}{N/2} \quad (14)$$

gdzie: $p_{rms}(+)$ oraz $p_{rms}(-)$, wyznacza się z zależności (13), odpowiednio dla maksymalnej Z_{max} oraz minimalnej Z_{min} wartości czynnika „ i ”, a wartości $\sum p_{rms}(+)$ oraz $\sum p_{rms}(-)$, to odpowiednio suma wyników doświadczeń, w których czynnik „ i ” przyjmował odpowiednio wartości Z_{max} i Z_{min} . Wartość krytyczną E_{kryt} wyznacza się na podstawie wariancji efektów $var(E_i)$ dla zmiennych fikcyjnych [7, 33], poprzez określenie w pierwszej kolejności błędu standardowego SE_{Ef} dla tych zmiennych według formuły:

$$SE_{Ef} = \sqrt{\frac{\sum E_f^2}{n_f}} \quad (15)$$

gdzie: E_f to efekty działania odpowiadające zmiennym fikcyjnych, n_f to liczba zmiennych fikcyjnych. Ostatecznie E_{kryt} oblicza się z zależności:

$$E_{kryt} = t_{\alpha, n_f} \cdot SE_{Ef} \quad (16)$$

gdzie: t_{α, n_f} to wartość krytyczna testu t Studenta przy poziomie istotności α i liczbie stopni swobody równej n_f . Czynniki uważa się za istotny, jeżeli efekt jego działania jest większy od efektu krytycznego tj. $E_i > E_{kryt}$, przy zadanym poziomie istotności α .

Druga metoda wyznaczenia wartości krytycznych określa marginesy błędów (MB - margines błędu, JMB - równoległy (jednoczesny)) będące jednocześnie wartościami krytycznymi efektów działania [14]. Wstępnie wyznacza się błąd $SE_0 = 1,5 \cdot \text{mediana}|E_i|$, a następnie błąd standardowy w postaci:

$$SE_1 = \sqrt{\frac{\sum E_i^2}{m}} \quad (17)$$

gdzie: m to liczba efektów działania o wartości bezwzględnej mniejszej niż $2,5 \cdot SE_0$. Marginesy błędów określa się z zależności:

$$MB = t_{(1-\alpha/2), m} \cdot SE_1 \quad JMB = t_{(1-\alpha^*/2), m} \cdot SE_1 \quad (18)$$

gdzie: $\alpha^* = 1 - (1 - \alpha)^{(1/m)}$. Czynniki, których efekty przekraczają wartości MB uważane są za prawdopodobnie istotne zaś przekraczające JMB za istotne. W praktyce jednak, jak opisano w literaturze [14], czynniki o wartościach przekraczających margines MB można uważać za istotne.

4. OPTIMALIZACJA-METODA SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

4.1. Sformułowanie problemu optymalizacji

Problem optymalizacji warunków brzegowych, co w praktyce odpowiada optymalizacji rozmieszczenia materiału absorpcyjnego można sformułować w sposób opisany poniżej.

Zmienne decyzyjne Z_{si} to wartości impedancji przypisane i -tej powierzchni s_i obszaru zamkniętego. W praktyce, podział taki może wynikać z kształtu obszaru związanego z przeznaczeniem i konstrukcją. Na przykład, w przypadku pomieszczeń mogą to być ściany, sufit, podłoga, co nie wyklucza innego, dodatkowego podziału na tych elementach. Zwiększa to jednak liczbę zmiennych decyzyjnych.

Funkcja celu $f\{Z_{si}\}$ przy danym wektorze zmiennych decyzyjnych $[Z_{si}]$ może zostać zapisana w postaci:

$$f\{Z_{si}\} = [p_{rms}, f_{koszt}]^T \quad (19)$$

gdzie: wielkość f_{koszt} definiuje koszt-nakład, który należy ponieść, żeby osiągnąć efekt określony wartością p_{rms} . W sformułowaniu problemu występują dwa przeciwstawne kryteria, które należy minimalizować. Wartość pierwszego z nich (p_{rms}) zmierza do minimum przy dążących także do minimum wartościach Z_{si} , czyli małej powierzchniowej impedancji brzegów. Wartości drugiego kryterium, ogólnej funkcji kosztów (f_{koszt}), rośnie wraz z minimalizacją Z_{si} . W rzeczywistości wzrost wartości funkcji kosztów można odnieść do ilości zużytych materiałów oraz wzrostu ich właściwości absorpcyjnych. Ze względu na to kryterium, preferowane jest takie modyfikowanie warunków brzegowych, aby efekt redukcji p_{rms} uzyskać poprzez jak najmniejsze powierzchnie o jak największej impedancji. W związku z powyższym kryterium to zdefiniowano w następujący sposób:

$$f_{koszt} = \sum_i^{N_i} (Z_{max} - Z_{si}) \cdot w_i \quad (20)$$

gdzie: Z_{max} to górna granica zakresu rozpatrywanych wartości impedancji, a N_i to liczba zmiennych decyzyjnych. Wagi w_i są proporcjonalne do wielkości powierzchni o impedancji Z_{si} , a ich suma równa się $\sum w_i = 1$. Ostatecznie, wyżej opisany problem optymalizacji, przy uwzględnieniu ograniczeń, uproszczeń i założeń opisanych poprzednio można zdefiniować następująco:

$$\begin{aligned} \min_{Z_{si}(d)} f\{Z_{si}(d)\} &= [p_{rms}, f_{koszt}]^T \\ Z_{si}(d) - Z_{max} &\leq 0 \wedge Z_{min} - Z_{si}(d) \leq 0, i = 1, 2, 3, \dots, N_i \end{aligned} \quad (21)$$

gdzie: $Z_{si}(d)$ oznacza zmienną decyzyjną, która może zależeć w ogólnym przypadku od szczególnego parametru d , jakim może być grubość materiału absorpcyjnego na powierzchni s_i [4, 5].

4.2. Algorytm genetyczny

Problem optymalizacji, w którym funkcja celu $f\{Z_{si}\}$ ma trudny do określenia charakter, z możliwością występowania wielu ekstremów, może być rozwiązany za pomocą metod sztucznej inteligencji. Proponowaną metodą w tym przypadku są algorytmy genetyczne [17, 28, 31]. Jak wynika z definicji (21), poszukiwane są rozwiązania w postaci podzbioru w zbiorze tzw. rozwiązań dopuszczalnych. Każdemu wektorowi zmiennych decyzyjnych $Z = [Z_1(d_1), Z_2(d_2), \dots, Z_{N_i}(d_{N_i})]$, który tworzą wartości impedancji i -tych powierzchni s_i odpowiadają wartości kryteriów wyznaczające jego położenie w przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych. Algorytm poszukuje rozwiązań spełniających kryterium Pareto-optymalności, czyli takich Z^O , którym odpowiada wektor $Z^O = [Z^O_1(d_1), Z^O_2(d_2), \dots, Z^O_{N_i}(d_{N_i})]$, dla którego $f(Z^O) = [p^O_{rms}, f^O_{koszt}]$ i jednocześnie nie istnieje inne rozwiązanie $Z^* = [Z^*_1(d^*_1), Z^*_2(d^*_2), \dots, Z^*_{N_i}(d^*_{N_i})]$, takie, że $f(Z^*) \leq f(Z^O)$ oraz $p^*_{rms} < p^O_{rms}$ lub $f^*_{koszt} < f^O_{koszt}$. Algorytm „sprawdza” iteracyjnie pod tym względem pewną, ograniczoną liczbę rozwiązań dopuszczalnych tzw. populację. Jej liczebność może, ale nie musi ulegać zmianie. Po wygenerowaniu populacji początkowej (pierwotnej) w działaniu algorytmu można wyróżnić trzy główne procesy: selekcji, krzyżowania i mutacji.

Na etapie selekcji, wyodrębnienie są tzw. rozwiązania niezdominowane. Rozwiązanie, odpowiadające wektorowi zmiennych decyzyjnych $Z^1 = [Z^1_1, Z^1_2 \dots Z^1_{Ni}]$ dominuje rozwiązanie odpowiadające wektorowi $Z^2 = [Z^2_1, Z^2_2 \dots Z^2_{Ni}]$ wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$\begin{cases} p_{rms}(Z^1) \leq p_{rms}(Z^2) \wedge f_{koszt}(Z^1) \leq f_{koszt}(Z^2) \\ p_{rms}(Z^1) < p_{rms}(Z^2) \vee f_{koszt}(Z^1) < f_{koszt}(Z^2) \end{cases} \quad (25)$$

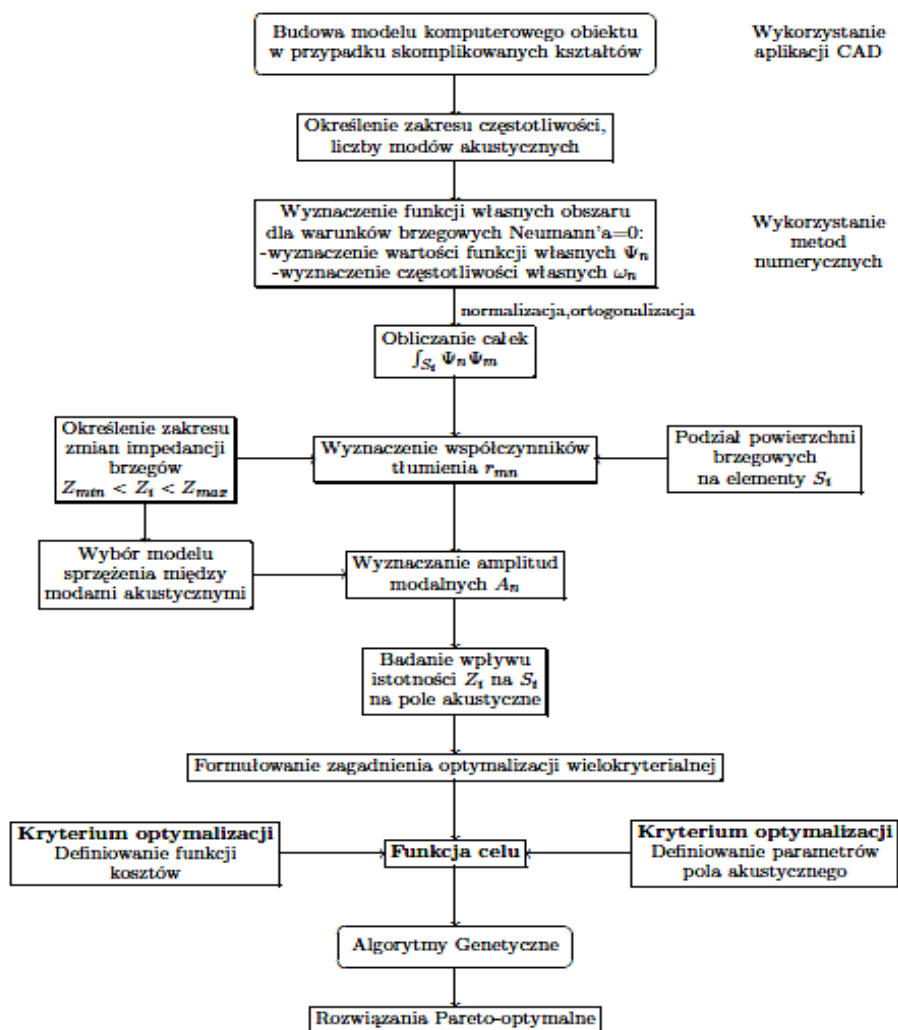
Następnie każdemu rozwiązaniu w badanej populacji nadawane są odpowiednie rangi. W każdej iteracji wszystkie niezdominowane rozwiązania wyznaczone zgodnie z (25) uzyskują rangę równą 1 ($rank=1$). Następnie są one czasowo usuwane z rozpatrywanej populacji i proces selekcji i poszukiwania rozwiązań niezdominowanych powtarza się. Tym razem wyselekcjonowane rozwiązania niezdominowane otrzymują rangę równą 2 ($rank=2$). Procedura ta jest powtarzana do chwili, gdy wszystkie rozwiązania w populacji otrzymają odpowiednio kolejne rangi. Następnie rangi są przeliczane w ten sposób, że osobniki z rangą 1 teraz otrzymują rangę zgodnie z formułą: $max(rank)+1-rank$. Tak więc osobniki z rangą 1 uzyskują teraz rangę najwyższą $max(rank)$, a te posiadające dotychczas rangę najwyższą otrzymują 1. Następnie stosując np. metodę ruletki wyodrębnia się „rodziców” dla nowej, „lepszej” generacji osobników [6, 31]. W ten sposób tworzone są pary rodziców. Procedura ruletki jest powtarzana do chwili, kiedy jej licznik („liczba obrotów”) nie osiągnie połowy populacji.

Następnie wyselekcjonowane pary osobników-rodziców tworzą nową generację potomków poprzez krzyżowanie i mutację. Jednocześnie tzw. *elityzm* gwarantuje bezpośrednie przejście części najlepszych genów bezpośrednio do nowej generacji. Stosowane są między innymi metody krzyżowania wielopunktowego [4, 5, 31] i mieszanego [6, 31].

Na etapie mutacji w każdej nowej generacji określona, wybrana część zmiennych decyzyjnych wektora $[Z_{si}]$ zamieniana jest na osobniki losowo wygenerowane. Zamyka to jeden cykl działania algorytmu, czyli kończy jedną iterację. Należy zwrócić uwagę, że dzięki procesowi selekcji opartemu na nadawaniu odpowiednich rang poszczególnym rozwiązaniom z badanej populacji, nie ma konieczności budowania funkcji transformującej (funkcji przystosowania, funkcji użyteczności) i wyznaczania wartości $f\{[Z_{si}]\}$, która występuje w ogólnej definicji Pareto-optimalności oraz w sformułowaniu problemu optymalizacji. Jej wartościom

w tym przypadku odpowiadają odpowiednie rangi.

PODSUMOWANIE



Rys. 1. Metodyka optymalizacji rozmieszczenia materiału absorpcyjnego na brzegach obszaru zamkniętego ze źródłem wibroakustycznym

Metodyka przedstawiona powyżej wraz z proponowanymi metodami dotyczy ogólnego przypadku zagadnienia generowania pola akustycznego wewnątrz obszaru zamkniętego przez obiekt wibroakustyczny. Przedstawione metody modelowania, badania istotności oraz optymalizacji są szczególnie efektywne w przypadku obszarów o skomplikowanym kształcie o wielu różnych powierzchniach brzegowych, z zaburzeniami o niskiej częstotliwości z wyraźnie dominującą częstotliwością. Efektywność przedstawionej powyżej metodyki, usystematyzowanej na schemacie blokowym (Rys.1.), opiera się na współdziałających elementach, jakimi są szybki model pola akustycznego, zaimplementowany w algorytmach genetycznych po usunięciu czynników nieistotnych, dając w rezultacie wynik optymalizacji.

METHODOLOGY OF THE OPTIMIZATION OF A CLOSED SPACE BOUNDARY CONDITIONS WITH A VIBROACOUSTICAL SOURCE IN A LOW FREQUENCY RANGE

Abstract

In the paper the methodology of a closed space boundary conditions optimization has been discussed. In the real problem this space could be vehicle cabin, technical compartment or some other working chamber. If inside a vibro-acoustical source is located, in the form of acting engine, vibrating part of same structure or other vibratory object, the interior acoustic field is generated. The part of acoustic waves induced by the source is absorbed by boundaries. The article deals with the question: how to form the boundary conditions in order to get required values of an acoustic field inside? The main steps and linked methods have been specified to reach the objective. The method of an acoustic field modeling, the method of reduction of insignificant factors and eventually direct method of optimization were presented. Application of the procedure in correct settings allows getting optimal boundary conditions configuration subject to chosen criteria.

BIBLIOGRAFIA

1. Anyunzoghé E., Cheng L.: *Improved integro-modal approach with pressure distribution assessment and the use of overlapped cavities*. Applied Acoustics 63, 2002.
2. Bliss D.B., Franzoni P.L.: *A discussion of modal uncoupling and an approximate closed-form solution for weakly coupled systems with application to acoustics*. Journal of the Acoustical Society of America, 103, 1998, str.1923-1932.
3. Błażejowski A., Krzyżyński T.: *A simple model of sound in enclosures with a low frequency harmonic excitation*. Vibrations in physical systems, Volume XXV, Poznań 2012.
4. Błażejowski A.: *Optymalizacja impedancyjnych warunków brzegowych obszaru z harmonicznym zaburzeniem wibroakustycznym*. Logistyka nr 6, 2011, str. 209-218.
5. Błażejowski A.: *Redukcja hałasu w pomieszczeniu z zaburzeniem wibroakustycznym poprzez optymalny rozkład materiału dźwiękochłonnego*. Pomiary Automatyka Kontrola nr 6, 2012, str. 536-539.
6. Błażejowski A., Krzyżyński T.: *Application of genetic algorithms in multi-objective optimization in room acoustics*. Logistyka nr 6, 2010, str. 281-289.
7. Burman J.P., Plackett R.L.: *The design of optimum multifactorial experiments*. Biometrika, 33, 1946, str. 305-325.
8. Cempel C.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa 1982.
9. Cempel C.: *Wibroakustyczna diagnostyka maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1985.
10. Cempel C.: *Wibroakustyka stosowana*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Poznań 1988.
11. Coppens A. B., Sanders J. V., Kinsler L. E., Frey A. R.: *Fundamentals of acoustics*. John Wiley and Sons Inc., fourth edition, New York, London 2000.
12. Delaney M.E., Bazley E.N.: *Acoustic properties of fibrous absorbent materials*. Applied Acoustics, 3, 1970, str. 105-116.
13. Doak P.: *Fluctuations of the sound pressure level in rooms when the receiver position is varied*. Acoustica, 9(1), 1959, str.1-9.

14. Dong F.: *On the identification of active contrasts in unreplicated fractional factorials*. Statistica Sinica, 3, 1993, str. 209-217.
15. Dowell E. H.: *Reverberation time, absorption, and impedance*. Journal of the Acoustical Society of America, 64, 1978, str. 181-191.
16. Engel Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Wydawnictwo Naukowe PWN, wydanie drugie poprawione i uaktualnione, Warszawa 2001.
17. Goldberg D.E.: *Klasyka informatyki. Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2003.
18. Gorman III G.F., Dowell E.H. and Smith D.A.: *Acoustoelasticity: General theory, acoustic natural modes and forced response to sinusoidal excitation, including comparisons with experiment*. Journal Sound and Vibration, 52(4), 1977, str. 519-542.
19. Goupy J.L.: *Methods for Experimental Design, Principles and Applications for Physicists and Chemists*. Elsevier, Amsterdam, 1993, str. 159-177, 421-427.
20. Horoshenko K.V., Khan A., i inni: *Reproducibility experiments on measuring acoustical properties of rigid frame porous media (round robin tests)*. Journal of the Acoustical Society of America, 122 (1), 2007, str. 345-353.
21. Ingard K. U., Morse F. M.: *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill Book Company, New York 1968.
22. Kacprzycki B.L.: *Planowanie eksperymenty. Podstawy matematyczne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974.
23. Kinsler L.E., Frey A.R., Coppens A.B., Sanders J.V.: *Fundamentals of acoustics, Third edition*, John Willey & Sons, New York 1982.
24. Kukielka L.: *Podstawy badań inżynierskich*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 2002.
25. Lafarge D., Lamariner P., Allard J.F.: *Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies*. Journal of the Acoustical Society of America, 102 (4), 1997, str. 1995-2006.
26. Massart D.L., Vander Heyden Y., Questier F.: *A ruggedness test strategy for procedure related factors : experimental set-up and interpretation*. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 17, 1998. str. 153-168.
27. Meissner M.: *Zastosowanie analizy modalnej do wyznaczania rozkładu pola akustycznego i czasu pogłosu w pomieszczeniu o złożonym kształcie*. 50 Otwarte Seminarium z Akustyki, Gliwice 2003, str.110-113.
28. Michalewicz Z.: *Algorytmy genetyczne+struktury danych=programy ewolucyjne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Wydanie trzecie, Warszawa 2003.
29. Missaoui J., Cheng L.: *A combined integro-modal approach for predicting acoustic properties of irregular-shape cavities*. Journal of the Acoustical Society of America 101, 1997.
30. Pan J.: *A third note on the prediction of sound intensity*. Journal of the Acoustical Society of America 105, 1999.
31. Popov A.: *Genetic algorithms for optimization, programs for matlab, version 1.0.*, <http://www.automatics.hit.bg>, 2005.
32. Schroeder M.R.: *The "Schroeder frequency" revisited*. Journal of the Acoustical Society of America, 99(5), 1996, str.3240-3241.
33. Smeyers-Verbeke J., Vandeginste B.G.M., Massart D.L., Vander Heyden Y., Nijhuis A.: *Guidance for robustness/ruggedness tests in method validation*. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 24, 2001, str. 723-753.

Autor:

Andrzej BŁAŻEJEWSKI