ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: ENERGETYKA z. 66 Nr kol. 562

Krzysztof J. JESIONEK, Jan JĘDRYSZEK,
Ryszard WYSZYŃSKI

Politechnika Wrocławska

WPŁYW WŁASNOŚCI MATERIAŁU KONSTRUKCYJNEGO NA CHARAKTERYSTYKĘ AKUSTYCZNĄ OSIOWYCH MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

Streszczenie. Maszyny osiowe należą do najuciążliwszych pod względem hałaśliwości i każdy element konstrukcyjny pozwalający tę hałaśliwość usunąć zasługuje na uwagę. Otóż przy badaniu izolacyjności akustycznej płyt przeznaczonych do wytłumiania wnętrz [1] zauważono pewne prawidłowości, które wykorzystać można również przy konstruowaniu przepływowych maszyn osiowych. Ponieważ badania były prowadzone dla płyt o dużej powierzchni, zależności zmodyfikowano celem objęcia zależnościami powierzchnie bardzo małe (np.: powierzchnia łopatki wentylatora). W pracy przeprowadzono analizę akustyczną dla kilku materiałów konstrukcyjnych, które dobrano jedynie z uwagi na różne własności mechaniczne. Zdefiniowano charakterystyczną częstotliwość koincydencji oraz podano zasady uwzględnienia niekorzystnego wpływu materiału konstrukcyjnego na charakterystykę akustyczną osiowej maszyny przepływowej.

Oznaczenia

c - prędkość dźwięku,
d - grubość płytki,
f - częstotliwość padającej fali akustycznej,
f_o - częstotliwość odniesienia,
f_k - częstotliwość koincydencji,
h - wysokość płytki,
v_o - prędkość drgań,
A - powierzchnia kontrolna,
E - moduł Younga,
N - moc akustyczna emitowana z płytki pobudzanej do drgań giętnych,
N_o - moc akustyczna odniesienia z płytki drgającej całą powierzchnią,
S - współczynnik mocy akustycznej,
δ - kąt ustawienia łopatek kierowniczych względem prostopadłej do piasty,
δ_k - kąt koincydencji ustawienia łopatek kierowniczych,
ν - współczynnik Poissona,
ϱ - gęstość materiału płytki (łopatki),
θ - kąt emisji względem prostopadłej do płytki (łopatki).

1. Zjawiska akustyczne towarzyszące padaniu fali akustycznej na cienką płytkę

W pracy [1] przeanalizowano różne przypadki oddziaływania fali akustycznej na cienkie płyty o dużej powierzchni. Stwierdzono, że cienka płyta o dużych wymiarach (można ją przyjąć jako nieograniczoną) może być pobudzona do drgań giętnych o amplitudzie prędkości v_o oraz częstotliwości f_k. Moc akustyczną emitowaną z płyty określono zależnością

$$\left.\begin{aligned} N &= \frac{\varrho c v_o^2 A}{2\sqrt{1-(f_k/f)^2}} && \text{dla} \quad f \geqslant f_k, \\ N &= 0 && \text{dla} \quad f < f_k. \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

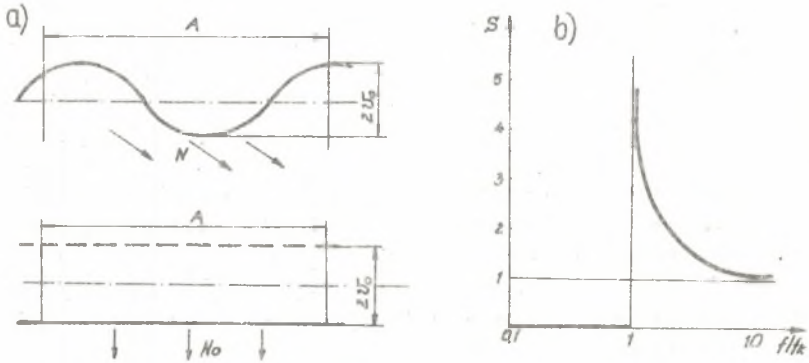
Do analizy przyjęto współczynnik mocy akustycznej zdefiniowany jako

$$S = \frac{N}{N_o}, \tag{2}$$

gdzie moc N_o dotyczy fali akustycznej emitowanej z płyty drgającej synfazowo (całą powierzchnią) również z amplitudą v_o. Moc N_o w równaniu (2) określono z zależności

$$N_o = \frac{1}{2} \varrho c v_o^2 A. \tag{3}$$

Schemat powyższego zagadnienia przedstawiono na rys. 1a.



Rys. 1. Schemat drgań cienkiej płyty do definicji współczynnika mocy akustycznej (a) oraz charakterystyka częstotliwościowa tego współczynnika (b)

Podstawiając wyrażenia (1) i (3) do (2), otrzymano ostatecznie

$$\left.\begin{aligned} S &= \left[1 - (f_k/f)^2\right]^{-\frac{1}{2}} && \text{dla} \quad f \geq f_k, \\ S &= 0 && \text{dla} \quad f < f_k. \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

Graficzny obraz zależności (4) przedstawiono na rys. 1b.

Z rys. 1 wynika, że najgorsze efekty izolacyjności uzyskuje płyta przy częstotliwości $f \geq f_k$, kiedy to dla $f = f_k$ efekt akustyczny rośnie teoretycznie nieograniczenie. Częstotliwość koincydencji f_k określono na podstawie [3]

$$f_k = \frac{c^2}{2\pi d}\sqrt{\frac{12\varrho(1-\nu)^2}{E}}. \tag{5}$$

Analizując wyrażenie (5) łatwo zauważyć, że częstotliwość koincydencji jest funkcją głównie dwóch zmiennych grubości płyty "d" oraz własności materiału (wyrażenie pod pierwiastkiem).

Tabela 1

Własności wybranych materiałów konstrukcyjnych

Materiał	E 10^9 N/m^2	ν	ϱ 10^3 kg/m^3
Stal	210	0,28	7.8
Aluminium	71	0,34	2.71
Mosiądz	100,5	0,35	8.1
Polimetakrylan metylu	5,5	0,33	1.18

Na rys. 2 przedstawiono zależność częstotliwości koincydencji od tych zmiennych dla stali, mosiądzu oraz polimetakrylanu metylu. Własności tych materiałów podano w tabeli 1 [4].

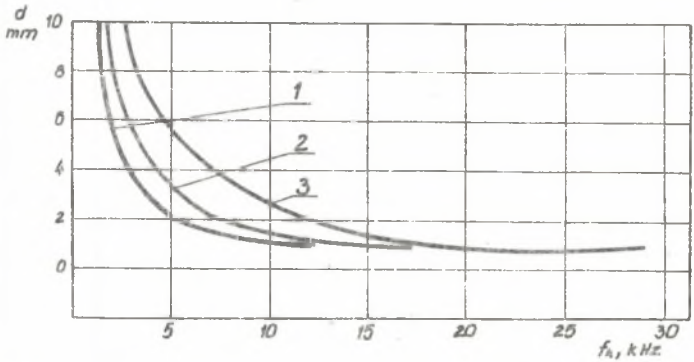
Posługując się powyższymi zależnościami, należy unikać w konstrukcjach maszyn przepływowych tak zwanych częstotliwości łopatkowych (maksimum w widmie hałasu), które odpowiadałyby częstotliwości koincydencji, ponieważ wtedy występuje znaczne zwielokrotnienie efektu akustycznego.

Należy też uwzględnić fakt, że łopatka maszyny posiada wymiary skończone i w związku z tym wyrażenie (4) ulegnie modyfikacji, przyjmując postać:

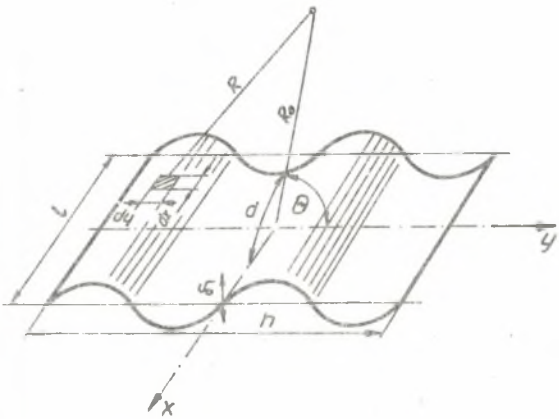
$$S = \frac{f}{\pi^2 f_k} \int_0^{\pi} \frac{\sin^2\left[\frac{\pi\sqrt{f \cdot f_k}}{f_o}\left(\sqrt{\frac{f}{f_k}}\cos\Theta - 1\right)\right]}{\left(\sqrt{\frac{f}{f_k}}\cos\Theta - 1\right)^2} d\Theta, \tag{6}$$

gdzie częstotliwość

$$f_o = c/h. \tag{7}$$



Rys. 2. Częstotliwość koincydencji w funkcji grubości płytki dla: 1 - stal, 2 - mosiądz, 3 - polimetakrylan metylu

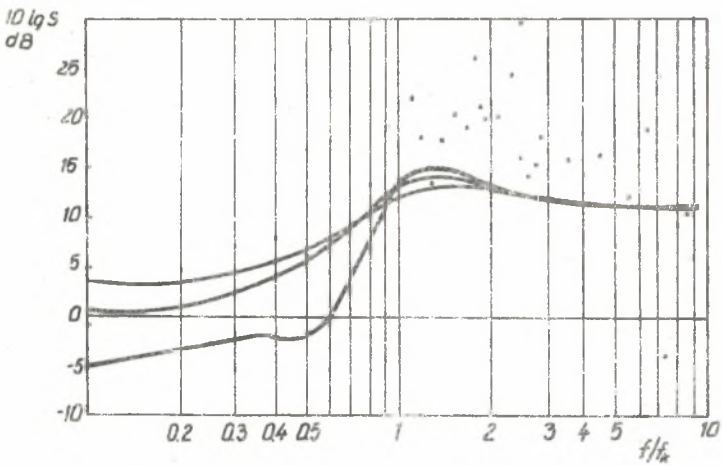


Rys. 3. Schemat układu współrzędnych do wyznaczania współczynnika mocy akustycznej dla cienkiej płytki o wymiarach skończonych

Schemat układu współrzędnych do powyższych zależności przedstawiono na rys. 3. Ponieważ schemat ten rozpatrzono w odniesieniu do łopatek wentylatora, wysokość ich należy odczytywać jako wielkość h, natomiast długość

profilu o stałej grubości jako 1. Długość ta nie ma wpływu na wartość liczbową zależności (6) przy założeniu, że $h > 1$. Zależność (6) dotyczy płytki swobodnej, natomiast łopatka wentylatora posiada utwierdzenie bądź to przy piaście (dla wirnika) bądź to przy piaście i na obwodzie (dla kierownicy). W celu porównania własności akustycznych różnych materiałów na rys. 4 przedstawiono zbiorczą charakterystykę dla stali, aluminium, mosiądzu i polimetakrylanu metylu. Wynika z niej, że najlepsze własności tłumiące posiada polimetakrylan metylu w zakresie $f < f_k$ oraz $f > f_k$, natomiast dla $f = f_k$ wzrost efektu akustycznego jest największy. Należy zaznaczyć, że wszystkie krzywe uzyskano dla wymiarów płytki dxh = 2x100 mm. Ponieważ, jak już wspomniano, łopatki wentylatora są utwierdzone, zależność (6) ulegnie dalszej modyfikacji

$$S = \frac{2f_o}{\pi^2 f_k} \int_0^{\pi} \frac{\sin^2\left[\pi\left(\frac{f}{f_o}\right)\cos\Theta\right]}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_k}\right)\cos^2\Theta\right]^2}\, d\Theta. \qquad (8)$$



Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa współczynnika mocy akustycznej (6) płytki o wymiarach dxh = 2x100 mm dla: 1 - stali (aluminium), 2 - mosiądzu, 3 - polimetakrylanu metylu

Wyniki obliczeń dla płytki stalowej o tych samych wymiarach według powyższego wyrażenia przedstawiono na rys. 4 punktami.

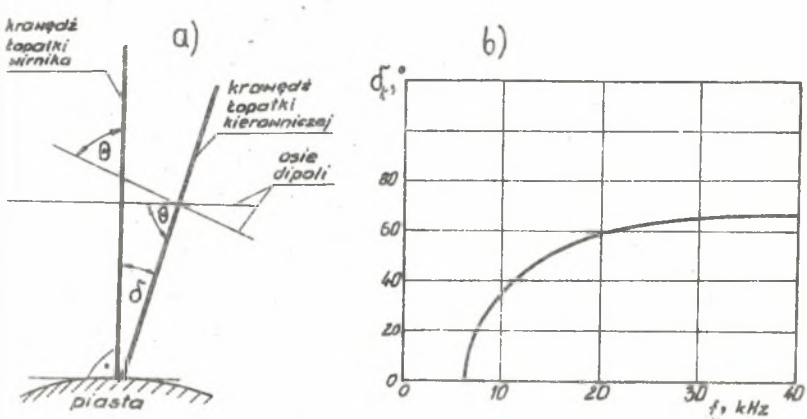
Ponieważ model reprezentowany przez wyrażenie (8) jest najbardziej zbliżony do rzeczywistości, uzyskane wyniki obliczeń mają praktyczne znaczenie przy konstruowaniu wzajemnie współpracujących palisad osiowych wirnika i kierownicy, a w szczególności dla zakresu częstotliwości $f > f_k$.

2. Wpływ zjawisk koincydencji na konstrukcję palisady łopatkowej wirnika i kierownicy

Z teorii hałasu wytwarzanego przez maszyny przepływowe [2] wynika, że na łopatkach maszyn osiowych generują się źródła dipolowe prostopadłe do powierzchni łopatki. Kąt wzajemnego położenia łopatek wirnikowych względem kierowniczych odgrywa poważną rolę. Zagadnienie to wyjaśniono schematycznie na rys. 5a. Dla $f > f_k$ istnieje w danych warunkach pewien kąt ustawienia, przy którym występuje maksimum emitowanej energii akustycznej. Kąt ten nazwano kątem koincydencji oraz określono zależnością

$$\delta_k = 90^\circ - \arcsin\sqrt{\frac{f_k}{f}}. \tag{9}$$

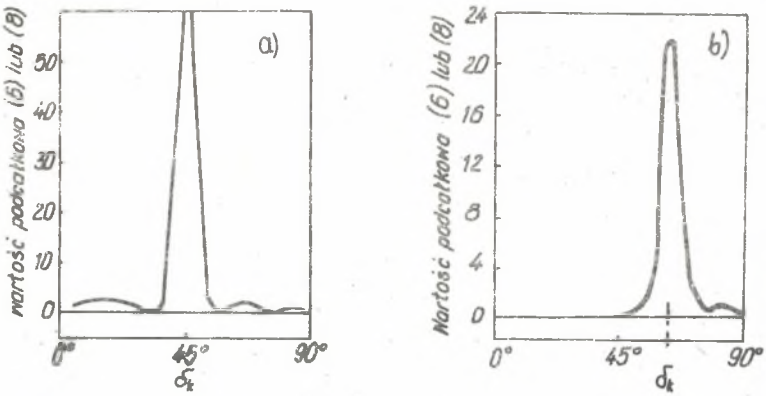
Graficzny obraz wyrażenia (9) w funkcji częstotliwości f dla płytki stalowej podano na rys. 5b.



Rys. 5. Schemat do wyznaczania kąta koincydencji współpracujących palisad wirnika i kierownicy (a) oraz kąt koincydencji w funkcji częstotliwości dla stali (b)

Ponieważ punkty na rys. 4 nie są rozłożone na jednej linii, przeanalizowano wyrażenia podcałkowe (8) w funkcji kąta Θ. Jak wynika z rys. 5a, jest to kąt dopełniający dla δ. W związku z tym na rys. 6 przedstawiono wartość wyrażenia podcałkowego (8) dla płytki stalowej przy wartościach stosunku $f/f_k = 2$ oraz $f/f_k = 5$.

Jak wynika z rys. 6 i rys. 5b, charakterystyka kątowa wyrażenia podcałkowego pozwala określić kąt koincydencji (odpowiedniki z rys. 6 zaznaczono na rys. 5b jako f_1 oraz f_2). Ujęcie podane na rys. 6 jest wygodniejsze, ponieważ pozwala określić zakres przedziału koincydencji. Z podanych rozważań wynika, że również kąt wzajemnego ustawienia palisad wirnika i kierownicy może mieć duży wpływ na efekt akustyczny.



Rys. 6. Charakterystyka kątowa wyrażenia podcałkowego (8) dla płytki stalowej

a) $f/f_k = 2$, b) $f/f_k = 5$

3. Uwagi i wnioski końcowe

Z analizy przedstawionych w opracowaniu materiałów wynika, że przy projektowaniu maszyn przepływowych należy brać także pod uwagę następujące wielkości:

- własności mechaniczne materiału i jego gęstość,
- częstotliwość koincydencji,
- kąt koincydencji.

Wpływają one w sposób wyraźny na efekt akustyczny pracującego urządzenia przepływowego (wentylator osiowy). Podkreślić należy, że powyższe wielkości pozwalają konstruktorowi kształtować "widmo" hałasu w kierunku obniżenia emisji zewnętrznej. Szczególną uwagę należy zwracać na tak zwane częstotliwości łopatkowe i ich harmoniczne, które zwykle dominują w widmie hałasu.

LITERATURA

[1] Gesele K.: Schallabstrahlung von Platten, die zu Biegeschwingungen angeregt sind. Acustica nr 3, s. 243-248, 1953.

[2] Jędryszek J.: Analiza hałasu generowanego przez wentylator osiowy powstałego wskutek oddziaływania palisady łopatkowej wirnika i kierownicy. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów, Komunikat nr I-20/K-220/76, Wrocław 1976.

[3] Malecki I.: Teoria fal i układów akustycznych. PWN, Warszawa, 1964.

[4] Mały Poradnik Mechanika. PWN, Warszawa 1963.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА АКУСТИЧЕСКУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ОСЕВЫХ ТУРБОМАШИН

Р е з ю м е

Турбомашины принадлежат к самым обременительным устройствам, производящим шум, и поэтому каждый конструкционный элемент, позволяющий устранить этот шум, заслуживает внимания.

В публикации представлен анализ акустических свойств конструкционных материалов, имеющих влияние на шум осевого вентилятора. Представленные результаты вычислений позволяют оценить влияние конструкционного материала решётки на акустическую мощность. Представлено также влияние частоты совпадения, а также угла совпадения на установление лопаток направляющего аппарата осевого вентилятора.

INFLUENCE OF CONSTRUCTIONAL MATERIAL ON THE ACOUSTIC
CHARACTER OF AXIAL-FLOW TURBOMACHINERY

S u m m a r y

An analysis of the acoustic properties of construction materials influencing noise levels of axial fans is being presented. Characteristic coincident frequencies have been defined along with the negative material impact on the acoustic features of an axial flow fan.