

XV Seminarium
ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2005
Oddział Gdański PTETiS

**ZASTOSOWANIE ŚRODOWISKA MATLAB DO WIZUALIZACJI
WYNIKÓW BADAŃ WIBROAKUSTYCZNYCH SILNIKÓW IN-
DUKCYJNYCH**

Andrzej DYKIER¹, Arkadiusz GRZEMSKI², Marcin WOLEJKO³

1. Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych, Sobieskiego 7, 80-216 Gdańsk
tel: 503-072-327 e-mail: anddyk@wp.pl
2. Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych, Sobieskiego 7, 80-216 Gdańsk
tel: (0-58)348-60-76 e-mail: agrzem@ely.pg.gda.pl
3. Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych, Sobieskiego 7, 80-216 Gdańsk
tel: (0-58)347-29-57 e-mail: mwolejko@ely.pg.gda.pl

Aplikacja „ADMotorNoise”, działająca w środowisku Matlab, została zrealizowana w ramach badań wibroakustycznych silników indukcyjnych w Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Gdańskiej. Głównym jej zadaniem jest graficzna wizualizacja wyników pomiarów wibroakustycznych silników asynchronicznych. Prezentacja graficzna odnosi się do trzech głównych elementów konstrukcyjnych silnika: korpusu i dwóch tarcz łożyskowych. Aplikacja ta umożliwia graficzną wizualizację wyników pomiarów eksploatacyjnych form odkształceń oraz analizę modalną stojana i tarcz łożyskowych oraz obliczenia i wizualizację rozkładu ciśnienia akustycznego nad tarczami łożyskowymi.

Szeroki zakres analizowanych przez program wyników pomiarów daje obraz jak poszczególne elementy wpływają na zjawiska wibroakustyczne w badanej maszynie elektrycznej.

1. WSTĘP

Przeprowadzanie złożonych pomiarów napotyka na ogromne trudności nie tylko podczas ich wykonywania, ale również podczas doboru programu, który umożliwiłby pełną wizualizację otrzymanych wyników. Uniwersalność programów przeznaczonych do tego celu niejednokrotnie nie daje satysfakcji. Procedury importu danych oraz wstępnych przygotowań (np. definiowanie geometrii) skłaniają do tworzenia własnych aplikacji dotyczących wizualizacji wyników pomiarów takich, które pozwalają na dostosowanie ich do potrzeb przeprowadzonych badań, umożliwiając jednocześnie zastosowanie niestandardowych rozwiązań oceny otrzymanych wyników lub obliczeń. Środowisko Matlab pozwala na szybkie tworzenie własnych aplikacji z graficznym interfejsem

użytkownika przy jednoczesnym działaniu na zmiennych różnych typów, ponadto jego możliwości obliczeniowe i wizualizacyjne oraz zasób gotowych bibliotek funkcji przesądzą niejednokrotnie o wyborze środowiska Matlab jako narzędzia programowania.

2. BADANIA LABORATORYJNE

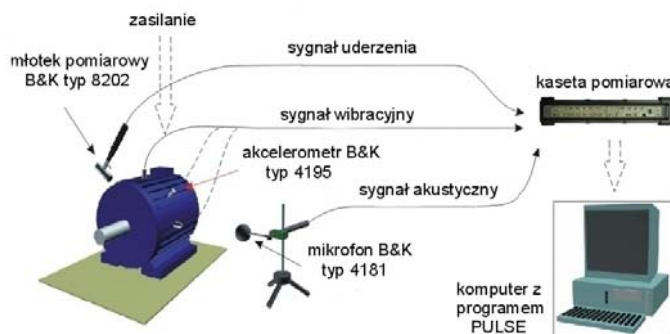
Stojany większości współcześnie produkowanych silników indukcyjnych małej mocy są budowy zamkniętej. Kadłub może być odlewem żeliwnym, stalowym lub aluminiowym, ewentualnie może być spawany ze zwijanej blachy stalowej, a jego kształt zbliżony jest do walca. Kadłub jest wyposażony w zewnętrzne żebra wentylacyjne, łapy, skrzynkę zaciskową, które powodują anizotropowość jego własności mechanicznych. Pakiet blach stojana jest wciśnięty do otworu kadłuba, który jest zakończony odlewanyymi tarczami łożyskowymi żeliwnymi, stalowymi lub aluminiowymi. Tarcze są mocowane do kadłuba za pośrednictwem zamków tarcz łożyskowych.

Dotychczas powstało wiele prac dotyczących mechanicznego modelowania struktury stojana dla modalnych form odkształceń i częstości drgań własnych. Modele, które opracowali m.in. Jordan [3,4], Erdelyi [1], Yang [8] Girgis i Verma [2,7] czy Timoszenka [6] zakładają, że największe znaczenie mają drgania powierzchni kadłuba o kierunku promieniowym. Przytoczone modele matematyczne opisu drgań i emisji hałasu maszyny elektrycznej zaniedbują żebra wentylacyjne, mocowania (łapy), skrzynkę zaciskową sprowadzając stojan do modelu idealnego cylindra.

2.1. Obiekt badań

W celu uproszczenia konstrukcji i upodobnienia maszyny do modelu matematycznego oraz w celu zwiększenia liczby punktów pomiarowych, zewnętrzna powierzchnia korpusu stojana silnika indukcyjnego została poddana obróbce mechanicznej. Zostało usunięte ożebrowanie wentylacyjne, skrzynka zaciskowa, łapy oraz przewietrznik wentylacyjny. Na korpusie silnika zaznaczono 168 punktów pomiarowych i po 48 punktów na każdej z tarcz łożyskowych. Tak przygotowany model rzeczywisty jest bliższy spotykanemu opisowi w wyżej wymienionych metodach obliczeniowych.

2.2. Układ i aparatura pomiarowa



Rys.1 Układ pomiarowy dla pomiarów wibroakustycznych

Pomiary przeprowadzano za pomocą systemu pomiarowego PULSE firmy Brüel&Kjær z kasetą pomiarową 3560C i modułami 3032A i 7533. System ten oferuje 16-

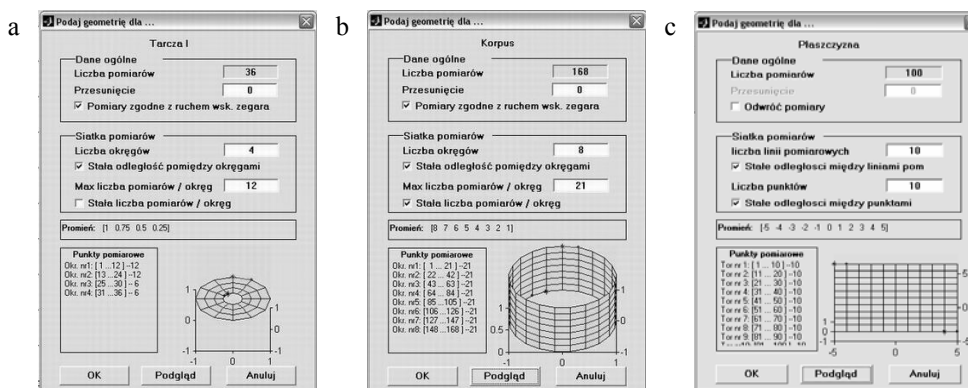
bitową rozdzielczość pomiaru amplitudy i częstotliwość próbkowania 65536Hz. Do analizy modalnej użyto młotek pomiarowy typ 8202 firmy Brüel&Kjær natomiast przetwornikiem drgań był akcelerometr typu 4195 firmy Brüel&Kjær. Do pomiarów akustycznych użyto mikrofonów typu 4181 oraz sondy natężeniowej typu 3548 firmy Brüel&Kjær.

3. APLIKACJA

3.1. Import danych

Aplikacja umożliwia import danych z pliku tekstowego otrzymanego w wyniku pomiarów. Struktura pliku jest ściśle określona. Pomiary muszą być wykonane w punktach pomiarowych z określoną kolejnością tak, aby stanowiły siatkę odwzorowującą powierzchnię nad tarczami łożyskowymi. Wszystkie dane, uzyskane w poszczególnych punktach pomiarowych, są umieszczone w jednym pliku. W przypadku bardzo dużej liczby punktów możliwy jest import częściowy, a następnie scalenie w jeden plik wynikowy. Dotyczy to również pomiarów dla różnych elementów silnika. Oddzielnie importujemy pliki dla tarcz i korpusu silnika, oddzielnie importujemy plik danych uzyskanych z pomiarów drgań, oddzielnie też z pomiarów akustycznych. W procesie scalania plików możliwe jest definiowanie liczby punktów pomiarowych oraz przypisanie zakresu pliku do odpowiedniego elementu. Zapis danych do pliku w środowisku Matlab pozwala na oszczędność czasu podczas importu danych oraz pamięci, a także pozwala przechowywać informację o geometrii siatki pomiarowej, którą należy odpowiednio zdefiniować w zależności od rodzaju pomiaru, jak i badanego silnika czy też elementu tego silnika.

3.2. Definiowanie geometrii



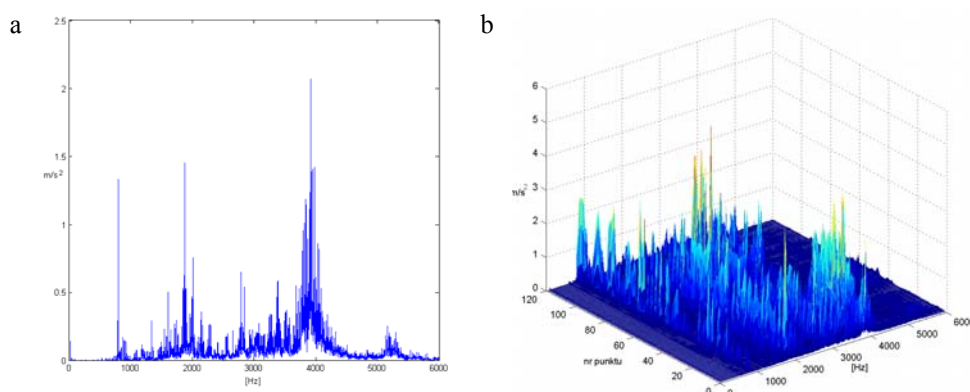
Rys.2. Okna dialogowe definiowania geometrii i powierzchni a) - definiowanie geometrii tarczy łożyskowej, b) - definiowanie geometrii korpusu silnika, c) - definiowanie powierzchni płaszczyzny nad tarczami łożyskowymi

Definiowanie geometrii polega na odwzorowaniu siatki pomiarowej zgodnie z przeprowadzonymi uprzednio pomiarami. Bezpośrednio po imporcie danych z pliku tekstowego pojawia się okno definiowania geometrii elementu lub powierzchni, której dane dotyczyły (Rys.2).

3.3. Wizualizacja i interpretacja wyników pomiarów

3.3.1 Określenie częstotliwości rezonansowych

Analizy drgań dokonujemy w dziedzinie częstotliwości. Aplikacja umożliwia wizualizację widma pomierzonego sygnału w dowolnie wybranym punkcie pomiarowym. Dla elementu złożonego z kilkudziesięciu lub większej liczby punktów pomiarowych częstotliwości rezonansowe mogą się nieznacznie różnić, dlatego też istnieje możliwość wizualizacji widma dla dowolnej liczby punktów pomiarowych w dowolnym zakresie częstotliwości.



Rys.3. Widmo pomierzonego sygnału: a) – widmo dla pojedynczego punktu pomiarowego, b) – widmo dla wielu punktów pomiarowych

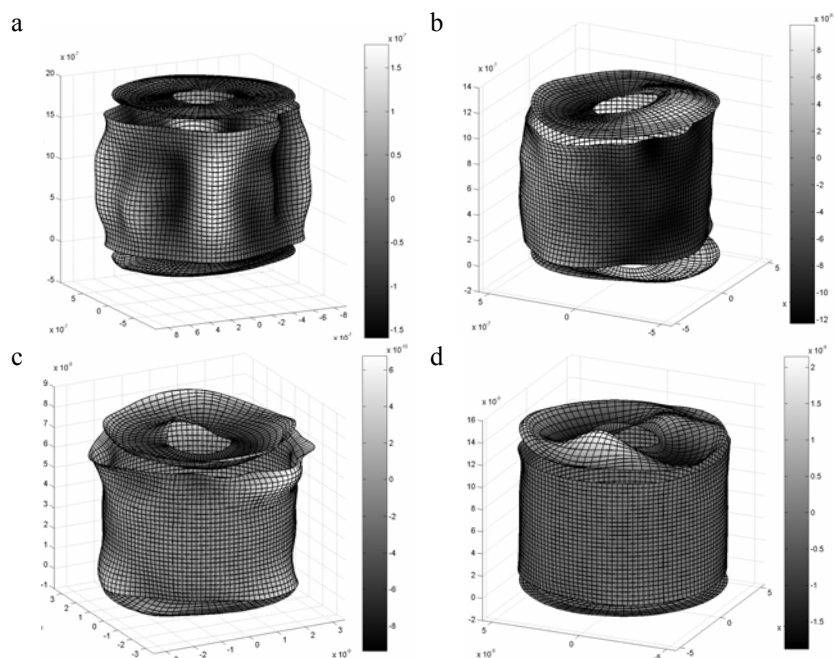
3.3.2 Wizualizacja odkształceń elementów stojana silnika indukcyjnego

W zależności od przeprowadzonych pomiarów istnieje możliwość wizualizacji eksploatacyjnych form odkształceń ODS (ODS – ang. Operational Deflection Shapes) oraz wyników testów modalnych. Przykładowe wyniki pomiarów ODS przedstawia rys. 4.

Analizując uzyskane wyniki pomiarów ODS, można wykazać dwa mechanizmy odkształcenia tarcz.

Pierwszy z nich obejmuje reakcję tarcz na odkształcenie kadłuba. Postaci drgań promieniowych kadłuba o liczbie par węzłów $n=1$, przenoszące się na tarczę poprzez zamek i gniazdo łożyskowe powodują wyboczenie tarczy w kierunku osiowym (np. 800Hz). Ujemnej półfali odkształcenia kadłuba odpowiada dodatnia półfala odkształcenia tarcz i odwrotnie. Przy większej liczbie węzłów odkształceń na obwodzie kadłuba tarcze praktycznie się nie odkształcają (np. 100Hz).

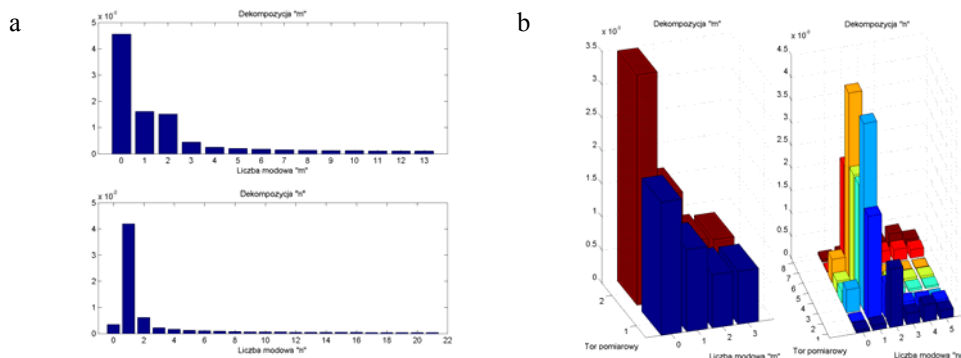
Drugi mechanizm drgań tarcz łożyskowych jest związany z siłami osiowymi. Wymuszenie siłami osiowymi dotyczy głównie jednej, w zależności od kierunku wirowania, tarczy łożyskowej. Działanie tych sił przenoszonych na jedną z tarcz poprzez czop wału i kadłub widoczne jest dla częstotliwości 4035Hz. Ten sam mechanizm widoczny jest dla częstotliwości 3086Hz i powoduje odkształcenie tarczy i kadłuba w miejscu ich bezpośredniego połączenia poprzez zamek. Dla tego przypadku widoczne jest zarówno osiowe wyboczenie środka tarczy do wewnątrz silnika jak i promieniowe wyboczenie części kadłuba nie mającej styku z pakietem stojana. Druga tarcza łożyskowa odkształca się podobnie z tym, że w zdecydowanie mniejszym stopniu.



Rys.4. Operacyjne formy odkształceń dla częstotliwości: a) 100 [Hz], b) 800 [Hz], c) 3086 [Hz], d) 4035 [Hz] (odkształcenie zdefiniowane w metrach)

3.3.3 Dekompozycja form odkształceń

Aplikacja pozwala na przedstawienie wyników dekompozycji złożonych form odkształceń w sposób szczegółowy lub uproszczony. Przykład dekompozycji formy odkształceń tarczy łożyskowej przy częstotliwości 800Hz, widocznej na rys.4b, przedstawiają rys.5a i rys.5b.



Rys.5 Przykładowa dekompozycja formy odkształceń tarczy łożyskowej przy częstotliwości 800Hz w sposób: a) uśredniony b) szczegółowy

Dekompozycja szczegółowa polega na analizie wyników dla każdego z torów pomiarowych indywidualnie. W wyniku dekompozycji szczegółowej nie uzyskuje się jedno-

znaczej informacji o formie odkształceń, gdyż każdy tor pomiarowy może generować inny udział podstawowych form odkształceń.

Dekompozycja uproszczona polega na wyborze tylko jednego toru pomiarowego, w celu określenia obwodowych form odkształceń oraz jednego toru do określenia form odkształceń wzdłużnych w przypadku korpusu lub promieniowych w przypadku tarczy łożyskowej.

Dekompozycja form odkształceń tarczy łożyskowej przy częstotliwości 800Hz, zarówno w sposób uproszczony jak i szczegółowy, daje informację o dominujących liczbach promieniowych (m) i obwodowych (n) liniach węzłowych, które wynoszą odpowiednio: m=0, n=1.

3.4. Wizualizacja i interpretacja wyników obliczeń akustycznych

W aplikacji użyto metody obliczania wielkości akustycznych nad powierzchnią tarcz łożyskowych na podstawie parametrów drgań mechanicznych, kształtu i wymiarów obiektu.

Parametrami akustycznymi są natężenie dźwięku i ciśnienie akustyczne. Do obliczenia tych wielkości potrzebna jest znajomość wielkości potencjału prędkości pola akustycznego. Aby obliczyć ten potencjał można zastąpić tarczę powierzchnią, na której ułożona jest nieskończenie wielka ilość źródeł pulsujących. Wytworzony przez jedno źródło punktowe potencjał prędkości w odległości R od źródła wynosi [9]:

$$\underline{\Phi} = \frac{dS \cdot v_0}{2\pi R} e^{j(\omega t - \beta R)} \quad (1)$$

gdzie: Φ – potencjał prędkości, dS – powierzchnia źródła dźwięku, v_0 – amplituda prędkości drgań powierzchni zewnętrznej źródła, t – czas, R – odległość od źródła dźwięku, ω – prędkość kątowna, β – zmiana fazy fali na jednostkę długości.

Zakładając, że tarcza łożyskowa jest złożona z nieskończonej liczby źródeł punktowych, na podstawie wzoru (1) można zapisać:

$$\underline{\Phi} = \frac{e^{j\omega t}}{2\pi} \int_{a_1}^{a_2} \int_0^{2\pi} \frac{a \cdot v(\varphi, a)}{R(\varphi, a)} e^{-j\beta R(\varphi, a)} d\varphi \cdot da \quad (2)$$

gdzie: $v(\varphi, a)$ – prędkość drgań elementarnych cząsteczek tarczy w funkcji odległości od środka tarczy oraz jej obwodu, $R(\varphi, a)$ – odległość od źródła dźwięku w funkcji odległości od środka tarczy oraz jej obwodu, a_1 – promień wewnętrzny tarczy łożyskowej, a_2 – promień zewnętrzny tarczy łożyskowej.

Wartość ciśnienia akustycznego p w dowolnym punkcie w przestrzeni w stanie ustalonym dla czasu $t_0=0$ można wyznaczyć ze wzoru:

$$p = \rho_0 \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$

gdzie: p – ciśnienie akustyczne, ρ_0 – średnia gęstość środowiska.

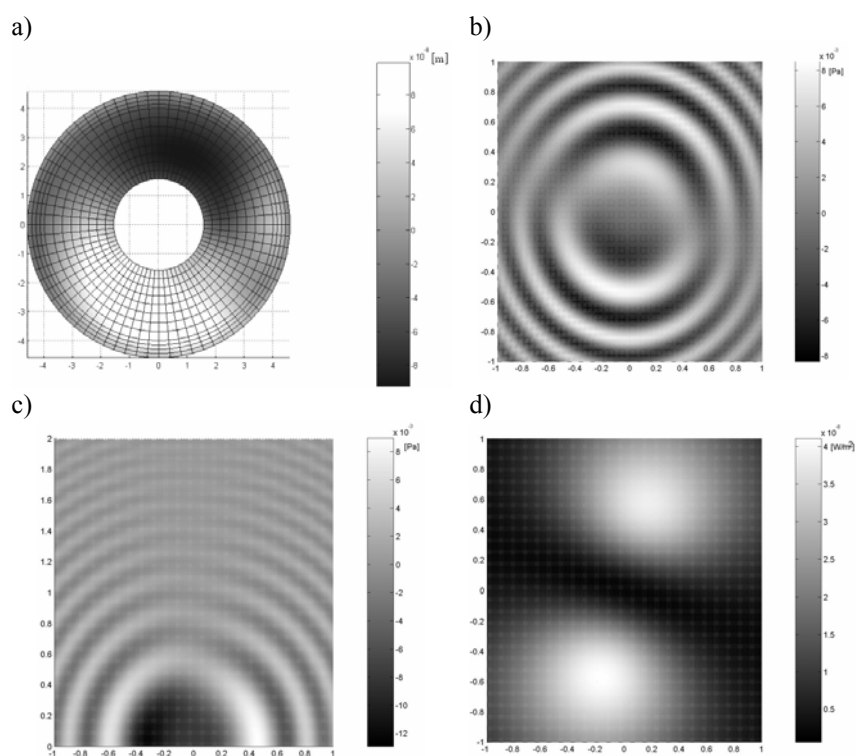
Tarcza łożyskowa na skutek drgań emituje energię akustyczną do otoczenia. Wielkość fizyczna zwana natężeniem dźwięku określa, jaka część wypromieniowanej energii

przeływa przez powierzchnię jednostkową. Natężenie dźwięku jest iloczynem ciśnienia akustycznego i prędkości cząstek środowiska uśrednionych w czasie:

$$\underline{I} = \underline{u} \cdot \underline{p}^* \quad (4)$$

gdzie: \underline{I} – zespolona wartość natężenia dźwięku, \underline{u} – zespolona wartość prędkości cząstek powietrza, \underline{p}^* – sprzężona wartość ciśnienia akustycznego.

Aplikacja pozwala na obliczenia rozkładu ciśnienia akustycznego i natężenia dźwięku na powierzchni sferycznej oraz na płaszczyznach: prostopadłej i równoległej do powierzchni tarczy.



Rys.6. Przykładowa wizualizacja pomiaru drgań i obliczeń akustycznych tarczy łożyskowej: a) ODS tarczy dla $f=800[\text{Hz}]$, obliczony rozkład ciśnienia akustycznego na powierzchni: b) równoległej do tarczy, c) prostopadłej do tarczy, d) obliczony rozkład natężenia dźwięku na powierzchni równoległej do tarczy

Otrzymane rozkłady ciśnienia akustycznego i natężenia dźwięku (Rys.6) mają charakter wyłącznie poglądowy, gdyż są wyznaczone przy założeniu pola swobodnego całkowicie pozbawionego odbić oraz bez udziału fal akustycznych wywołanych pozostałymi elementami np.: pracą łożysk. Należy również pamiętać o tym, iż rozkład ciśnienia akustycznego dotyczy wybranej chwili czasowej.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zasadniczym celem stworzonej aplikacji była możliwość graficznej wizualizacji przestrzennych wibracyjnych odkształceń zewnętrznej powierzchni kadłuba i tarcz łożyskowych oraz przestrzennego rozkładu parametrów emitowanego przez silnik hałasu.

Utworzona aplikacja obejmuje: algorytm importu danych wibroakustycznych z profesjonalnego systemu akwizycji danych, moduł definiowania współrzędnych przestrzennych punktów pomiarowych, narzędzie do identyfikacji częstotliwości charakterystycznych w widmach drgań, graficzną trójwymiarową prezentację odkształceń powierzchni zewnętrznej silnika, graficzną trójwymiarową prezentację rozkładu pola akustycznego tarcz łożyskowych, moduł dekompozycji złożonych form odkształceń, procedury obliczeń, na podstawie drgań tarczy łożyskowej, rozkładu ciśnienia akustycznego, natężenia dźwięku oraz poziomu mocy akustycznej.

Aplikacja stanowi pomoc w badaniach laboratoryjnych własności wibracyjnych i akustycznych maszyn elektrycznych oraz prezentacji graficznej ich wyników.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Erdelyi E., Horvay G. : Vibration modes of stators of induction motors. ASME Trans. 1957, vol.24, nr79, s.39-45
2. Girgis R.S., Verma S.P. : Method of accurate determination of resonant frequencies and vibration behaviour of stators of electrical machines. IEE proc. B, Electr. Power Appl., 1981, vol.128, s.1-9
3. Jordan H. : Angenäherte Berechnung des magnetischen Gerauscher von Käfigläufermotore. ETZ 1950, H.18, s.491-494
4. Jordan H. : Geräuscharme Elektromotoren. V.Girardet, Essen 1950
5. Karkosiński D. Wołejko M. : Vibrational Deflection Shapes of Induction Motor's Stator. 39th International Symposium on Electrical Machines Gdańsk-Jurata, 9-11 June 2003, Proceeding – Summaries, s.85 ISBN 83-911669-9-6
6. Timoszenko S.P. : Kolebanija v inženiernom dele. GIFML, 1959
7. Verma S. P., Girgis R. S. : Experimental verification of resonance frequencies and vibration behaviour of stator of electrical machines, Part 1 – Models, experimental procedure and apparatus. IEE Proc. B. Electr. Power Appl. 1981, vol. 128, s.12-21
8. Yang S.J. – Low-Noise Electrical Motors. Clarendon Press, Oxford 1981
9. Żyszkowski Z. – Podstawy elektroakustyki, WNT Warszawa 1984.

APPLICATION OF MATLAB FOR VISUALIZATION OF VIBROACOUSTIC MEASUREMENTS OF INDUCTION MACHINES.

The application “ADMotorNoise” was created in the Matlab environment. The main use of this application is graphic visualization of vibroacoustic measurements of low-power squirrel-cage induction motors. The application makes possible the visualization of operational deflection shapes of the frame and bearing shields and the visualization of the distribution of sound pressure and sound intensity in front of bearing shield.