

XIV Seminarium
ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2004
Oddział Gdański PTETiS

**PRZEWIDYWANIE WIDMA HAŁASU SILNIKA
SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI
NA PODSTAWIE MODELOWANIA EKSPERYMENTALNEGO**

Sławomir BUJACZ¹, Marcin WOŁEJKO², Janusz NIEZNAŃSKI³, Michał MICHNA⁴
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,
Katedra Energoelektroniki Maszyn Elektrycznych, ul. Sobieskiego 7, 80-216 Gdańsk.

- | | | |
|-------------------|----------------|--------------------------------|
| 1. tel: 347-60-76 | fax: 341-08-80 | e-mail: sbujacz@ely.pg.gda.pl |
| 2. tel: 347-29-54 | fax: 341-08-80 | e-mail: mwolejko@ely.pg.gda.pl |
| 3. tel: 347-16-75 | fax: 341-08-80 | e-mail: jniez@ely.pg.gda.pl |
| 4. tel: 347-29-79 | fax: 341-08-80 | e-mail: mmichna@ely.pg.gda.pl |

W niniejszym referacie przedstawiono zastosowanie symulacji komputerowej do estymacji hałasu wytwarzanego przez maszynę elektryczną. Zaprezentowano metodę pozwalającą przewidywać kształt widma hałasu emitowanego przez silnik synchroniczny z magnesami trwałymi na podstawie widma prądu fazowego. Przedstawiono i porównano wyniki pomiaru widma hałasu emitowanego przez silnik oraz widma hałasu estymowanego. Estymację widma hałasu przeprowadzono na podstawie widma prądu mierzonego oraz prądu uzyskanego z symulacji komputerowej w programie TCad 7.0. Prezentowana metoda okazuje się prostym i skutecznym narzędziem oceny metod zasilania impulsowego pod kątem ich wpływu na emisję hałasu maszyny bez konieczności wykonywania pomiarów akustycznych.

1. WSTĘP

W wytwarzaniu niepożądanego hałasu w środowisku coraz większy udział mają maszyny elektryczne. Przewiduje się, że udział ten będzie wzrastał, w miarę coraz powszechniejszego stosowania ekologicznych napędów w pojazdach i postępującej automatyzacji. Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi są stosowane coraz częściej m.in. w nowoczesnych napędach trakcyjnych i napędach statków. Emisja hałasu między innymi tego rodzaju maszyny staje się zatem jednym z podstawowych wskaźników jakości i dlatego musi być uwzględniana na etapie projektowania zarówno samej maszyny jak i jej zasilania. Konieczne jest więc opracowanie dokładnych modeli emisji hałasu maszyny i metod jego estymacji. Krokiem w tym kierunku jest metoda prezentowana w referacie, która została opracowana dla maszyn indukcyjnych [1] i z powodzeniem zastosowana dla prototypu silnika synchronicznego (dane badanego silnika można znaleźć w pracy [2]). Pozwala ona przewidywać widmo hałasu emitowanego przez silnik zasilany za pomocą falownika na podstawie widma prądu fazowego uzyskanego z pomiaru lub z symulacji komputerowej.

2. CHARAKTERYSTYKA METODY PREDYKCJI WIDMA HAŁASU

2.1. Model dekompozycji widma hałasu

U podstaw opracowanej metody predykcji widma hałasu leży założenie, zgodnie z którym widmo ciśnienia akustycznego w ustalonym punkcie w otoczeniu silnika zawiera składnik zależny bezpośrednio od harmonicznych prądu wynikających z kształtu napięcia zasilania oraz składnik zależny od harmonicznych prądu wynikających z konstrukcji maszyny. Zgodnie z powyższym widmo hałasu emitowanego przez silnik zawiera składową zależną od rodzaju zasilania silnika oraz składową niezależną od rodzaju zasilania.

Jeżeli przez $H_{EA}(f)$ i $N_{base}(f)$ oznaczymy pewne charakterystyki widmowe danego silnika oraz przez $N_j(f)$ widmo ciśnienia akustycznego w pewnym ustalonym punkcie przestrzeni w otoczeniu badanego silnika dla j -tego rodzaju zasilania, zaś przez $I_j(f)$ widmo prądu zasilającego dla tego samego rodzaju zasilania, możemy zapisać [1]:

$$N_j(f) = N_{base}(f) + H_{EA}(f) \cdot I_j(f) \quad (1)$$

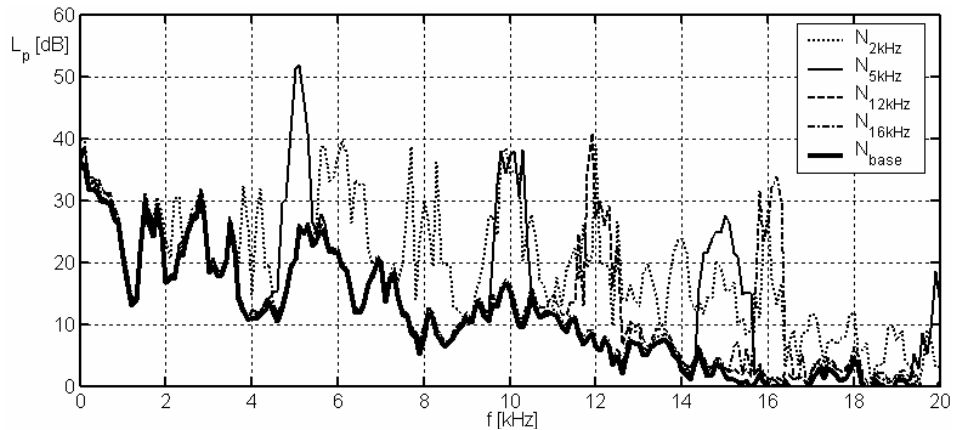
gdzie: $N_j(f)$ – widmo hałasu dla j -tego rodzaju zasilania [Pa], $N_{base}(f)$ – składnik widma hałasu niezależny od widma prądu zasilającego [Pa], $I_j(f)$ – widmo prądu fazowego dla j -tego rodzaju zasilania [A], $H_{EA}(f)$ – funkcja przejścia pomiędzy widmem prądu i odpowiadającym mu składnikiem widma hałasu [Pa/A]

Zgodnie z równaniem (1) składnikiem widma hałasu niezależnym od rodzaju pobudzenia elektromagnetycznego jest składnik $N_{base}(f)$. Składnik ten jest zarazem widmem hałasu emitowanego przez silnik w przypadku zasilania napięciem sinusoidalnym. Zawiera on w sobie wszystkie składowe wynikające z konstrukcji maszyny, niezwiązane z wyższymi harmonicznymi napięcia zasilania. Składnikiem uzależnionym bezpośrednio od rodzaju pobudzenia jest drugi składnik równania (1) $H_{EA}(f) \cdot I_j(f)$. Składnik ten jest z kolei wynikiem odkształcenia napięcia zasilającego i występuje tylko w przypadku pojawienia się dodatkowych harmonicznych prądu wymuszonych przez źródło zasilania silnika. Charakterystyka oznaczona jako $H_{EA}(f)$ opisująca zależność między dodatkowym składnikiem hałasu silnika i prądem zasilania została nazwana *transmitancją elektroakustyczną* silnika [1]. Przyjmując model dekompozycji hałasu silnika opisany równaniem (1), możemy estymować kształt widma hałasu dla danego silnika znając jego charakterystyki $N_{base}(f)$ i $H_{EA}(f)$ dla dowolnego wariantu zasilania przeksztaltnikowego. Wystarczy wyznaczyć widmo prądu fazowego $I_j(f)$ i skorzystać z zależności (1). Jednorazowe wyznaczenie wspomnianych charakterystyk dla danego silnika pozwala uniknąć konieczności pomiarów akustycznych przy zmianie rodzaju zasilania. Dodatkowo, dysponując dostatecznie dokładnym modelem obwodowym silnika, można wyznaczyć widmo prądu zasilania za pomocą symulacji komputerowej, a następnie wyznaczyć przewidywane widmo hałasu bez przeprowadzania jakichkolwiek dodatkowych pomiarów laboratoryjnych.

2.2. Wyznaczanie charakterystyk $N_{base}(f)$ i $H_{EA}(f)$

Jak wspomniano wcześniej charakterystyka $N_{base}(f)$ jest widmem ciśnienia akustycznego w pewnym punkcie w otoczeniu silnika zasilanego napięciem sinusoidalnym. Można zatem wyznaczyć tę charakterystykę w prosty sposób dokonując pomiarów akustycznych przy zasilaniu czysto sinusoidalnym. W przypadku dysponowania wynikami pomiarów jedynie dla zasilania falownikowego istnieje również alternatywny sposób wyznaczenia tejże charakterystyki. Na podstawie badań wykonanych dotychczas dla maszyn indukcyj-

nych stwierdzono bowiem, że w przypadku modulacji o charakterze tonalnym, takiej jak deterministyczna modulacja PWM (o stałej wartości częstotliwości nośnej), widmo ciśnienia akustycznego zawiera istotny składnik postaci $H_{EA}(f)I(f)$ jedynie w pewnych pasmach częstotliwości wokół krotności częstotliwości nośnej. W pozostałych przedziałach częstotliwości widmo ciśnienia akustycznego dla zasilania falownikowego pokrywa się praktycznie z widmem towarzyszącym zasilaniu napięciem sinusoidalnym. Możliwe jest zatem odcinkowe odtwarzanie widma odpowiadającego zasilaniu sinusoidalnemu poprzez odpowiedni dobór wariantów modulacji [1]. Dysponując odpowiednio dobraną serią pomiarów ciśnienia akustycznego dla kilku różnych wariantów modulacji PWM o charakterze tonalnym, można wyznaczyć $N_{base}(f)$ jako wartość minimalną dla każdego f ze wszystkich wykonanych pomiarów. Tak wyznaczona wartość $N_{base}(f)$ jest więc po prostu dolną obwiednią zestawu charakterystyk widmowych $N_j(f)$ zmierzonych przy zasilaniu badanej maszyny z falownika napięcia. Ten sposób wyznaczenia charakterystyki $N_{base}(f)$ obrazuje rysunek 1. Na rysunku tym przedstawiono zestaw kilku widm ciśnienia akustycznego dla różnych częstotliwości nośnych modulacji i zaznaczono dolną obwiednią stanowiącą szukaną charakterystykę $N_{base}(f)$. Ze względu na większą przejrzystość rysunku przedstawiono ograniczoną liczbę charakterystyk.



Rys. 1. Wyznaczanie charakterystyki widmowej $N_{base}(f)$ dla badanego silnika na podstawie kilku pomiarów ciśnienia akustycznego dla różnych wariantów modulacji PWM

Dysponując charakterystyką $N_{base}(f)$ wyznaczoną w opisany sposób, równanie (1) można przekształcić do postaci :

$$I_j(f) \cdot H_{EA}(f) = N_{add,j}(f) \quad (2)$$

gdzie:

$$N_{add,j}(f) = N_j(f) - N_{base}(f) \quad (3)$$

Transmitancji elektroakustyczna $H_{EA}(f)$ jest wyznaczana dla każdej częstotliwości f z równania (2). Jest to możliwe w przypadku dysponowania wynikami pomiarów prądu

i hałasu dla pobudzenia szerokopasmowego obejmującego cały badany zakres częstotliwości. W Przypadku dysponowania n wynikami pomiarów dla pobudzeń szerokopasmowych o węższych zakresach częstotliwości niezbędne jest zastosowanie metody opartej na rozwiązaniu nadokreślonego układu równań (ang. *overdetermined*) [3] z jedną niewiadomą:

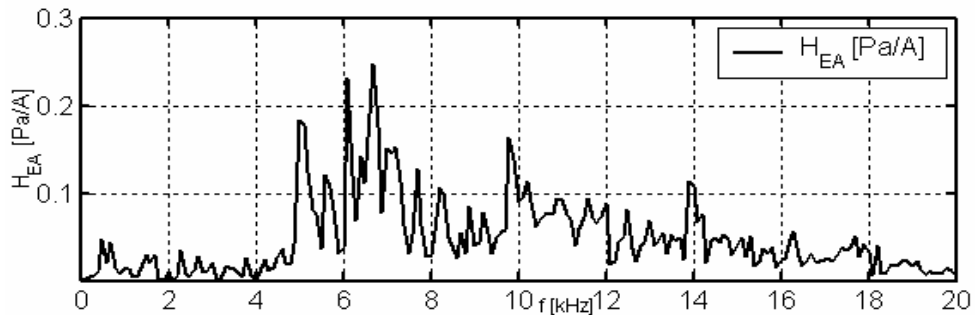
$$\begin{aligned} I_1(f) \cdot H_{EA}(f) &= N_{\text{add},1}(f) \\ I_2(f) \cdot H_{EA}(f) &= N_{\text{add},2}(f) \\ &\dots\dots\dots \\ I_j(f) \cdot H_{EA}(f) &= N_{\text{add},j}(f) \\ &\dots\dots\dots \\ I_n(f) \cdot H_{EA}(f) &= N_{\text{add},n}(f) \end{aligned} \quad (4)$$

Rozwiązanie układu (4) ma następującą postać [1]:

$$H_{EA} = (\mathbf{I}^t \mathbf{I})^{-1} \mathbf{I}^t \mathbf{N}_{\text{add}} \quad (5)$$

gdzie wyrażenie $(\mathbf{I}^t \mathbf{I})^{-1} \mathbf{I}^t$ jest macierzą pseudo-odwrotną macierzy \mathbf{I} zwaną także uogólnioną macierzą odwrotną lub macierzą odwrotną Moore'a-Penrose'a [3].

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę widmową $H_{EA}(f)$ będącą rozwiązaniem układu równań (4) dla badanego silnika.

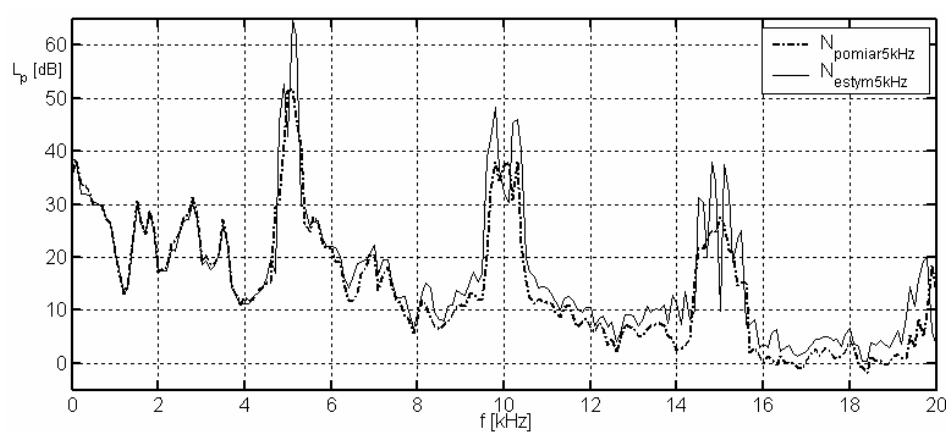


Rys. 2. Charakterystyka widmowa $H_{EA}(f)$ badanego silnika wyznaczona z układu równań (4)

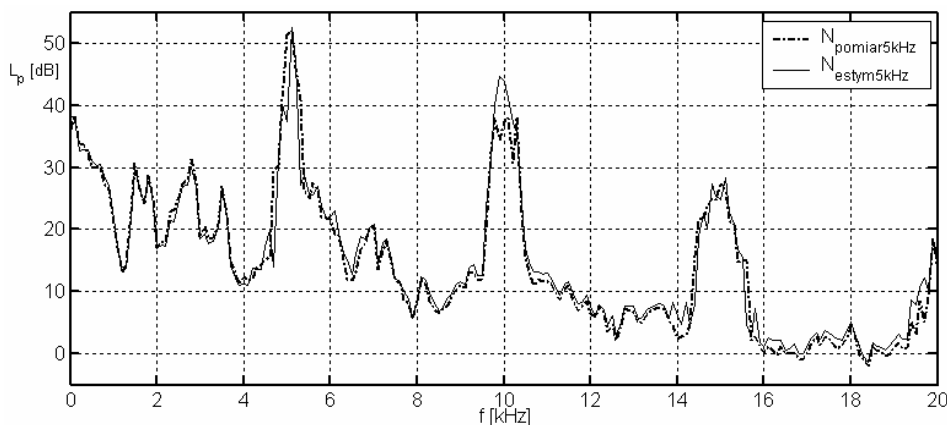
3. PREDYKCJA WIDMA HAŁASU

Jak wspomniano w poprzednim paragrafie, predykcja widma hałasu może być wykonana w oparciu o widmo prądu uzyskanego z pomiaru, bądź, w przypadku dysponowania dostatecznie dokładnym modelem obwodowym maszyny, z symulacji komputerowej. Rysunek 3 przedstawia porównanie charakterystyk widmowych hałasu rzeczywistego oraz estymowanego opisaną metodą z wykorzystaniem widma prądu uzyskanego z symulacji w programie TCad 7.0 (w obliczeniach wykorzystano uproszczony model obwodowy maszyny synchronicznej istniejący w programie TCad). Prezentowane wyniki dotyczą zasilania silnika z falownika napięcia z modulacją SVPWM z częstotliwością nośną 5kHz. Jak widać dzięki symulacji możliwe jest odtworzenie kształtu widma hałasu generowanego

przez silnik. Istniejące rozbieżności między widmem estymowanym a widmem rzeczywistym nie wynikają jednak z wady stosowanej metody, lecz są wynikiem niedoskonałości zastosowanego modelu i wprowadzonych uproszczeń. Dla porównania na rysunku 4 przedstawiono podobne zestawienie charakterystyk przy identycznym zasilaniu, lecz z estymacją na podstawie widma prądu pomierzonego w rzeczywistym układzie.



Rys. 3. Porównanie widma hałasu estymowanego z widmem hałasu uzyskanego z pomiaru. Estymacja na podstawie prądu uzyskanego z symulacji.



Rys. 4. Porównanie widma hałasu estymowanego z widmem hałasu uzyskanego z pomiaru.

W obu przypadkach (rys.3 i rys.4) uzyskano zadowalającą zgodność wyników, co potwierdza przydatność zastosowanej metody predykcji. W przypadku zilustrowanym na rys.3 dostrzegalne są większe rozbieżności niż na rys.4, co jest związane z zastosowanymi uproszczeniami modelu obwodowego maszyny. Obliczenia symulacyjne pozwalają jednak uniknąć konieczności wykonywania pomiarów i umożliwiają wstępną ocenę stosowanych metod zasilania impulsowego.

4. PODSUMOWANIE

Prezentowana w niniejszym referacie metoda predykcji hałasu jest skutecznym i prostym narzędziem estymacji kształtu widma hałasu generowanego przez silnik zasilany z falownika. Może stanowić ona istotny krok w kierunku rozwoju metod predykcji hałasu znacznie prostszych niż stosowane obecnie. Dzięki symulacji komputerowej modelu obwodowego można uzyskać zadowalające wyniki przy mniejszym nakładzie pracy i czasu. Wadą przedstawionego rozwiązania jest natomiast konieczność posiadania rzeczywistego silnika w celu uzyskania jego charakterystyk niezbędnych do obliczeń. Metoda ta jednak dobrze sprawdza się w przewidywaniu hałasu dla różnych rodzajów zasilania impulsowego danego silnika bez konieczności wykonywania wielokrotnych pomiarów akustycznych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. WOŁEJKO M.: Analiza związków pomiędzy zjawiskami wibroakustycznymi w maszynach indukcyjnych a właściwościami zasilania falownikowego, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2004;
2. MICHNA M.: Wpływ struktury obwodów magnetycznych na wybrane parametry silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2004;
3. JACKSON L.B.: Digital Filters and Signal Processing, Kluwer, Boston 1996;
4. BALAN A., VERMA S.P.: Considerations for the Reduction of Vibrations and Noise in the Design of Induction Motors for Variable Frequency Operatio, ICEM'98 vol 1/3, s.490-495, 2-4 Sept. 1998;
5. ZHU Z.Q., HOWE D.: Improved methods for prediction of electromagnetic noise radiated by electrical machines, IEE Proc.-Electr. Power Appl. , Vol. 141, No.2, 1994, s.109-120.

ESTIMATION OF NOISE SPECTRUM OF PERMANENT MAGNET MOTOR ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL MODELLING

This paper presents the use of computer simulation and a new method of estimation of noise spectrum emitted by permanent magnet synchronous motor on the basis of phase current spectrum. The estimated and measured noise spectra are presented and compared. The estimation of noise has been carried out on the basis of measured and simulated current with the use of TCad 7.0. The presented method turned out to be simple and effective tool of evaluation of methods of impulse supply as regards of their influence of noise emission of machine without the need of acoustic measurement.