

Modelowanie i projektowanie ultradźwiękowych układów drgających dużej mocy

Designing and modeling of the ultrasonic stack systems

PAWEŁ KOGUT
ANDRZEJ MILEWSKI *

Materiały z XX SKWPIE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.145

W pracy przedstawiono przegląd metod modelowania i projektowania ultradźwiękowych układów drgających stosowanych w systemach zgrzewania i wycinania ultradźwiękowego. Omówiono metody modelowania analitycznego i numerycznego elementów układu drgającego, w tym: przetwornika segmentowego, koncentratora i sonotrody. **SŁOWA KLUCZOWE:** przetwornik ultradźwiękowy, koncentrator, sonotroda, układ drgający

In the paper authors presents an overview of the ultrasonic stack systems designing and modeling methods used in ultrasonic welding and cutting systems. Analytical and numerical methods have been outlined with reference to ultrasonic stack component elements such as: sandwich type transducer, booster and sonotrode.

KEYWORDS: sandwich transducer, booster, sonotrode, ultrasonic stack

Ultradźwiękowy układ drgający

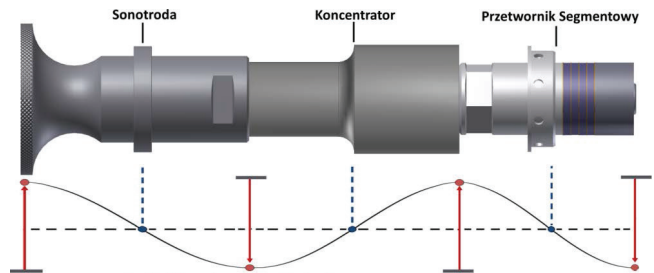
Układ drgający dużej mocy przeznaczony do zastosowania w systemach zgrzewania i wycinania ultradźwiękowego najczęściej składa się z trzech elementów: przetwornika segmentowego, koncentratora oraz sonotrody (rys. 1).

Przetwornik segmentowy stanowi element konwertera energii elektrycznej na mechaniczną. Składa się on z kaskadowo połączonych stosu przetworników piezoceramicznych oraz metalowych mas obciążających, nazywanych reflektorem oraz emiterym. Sprężenie mechaniczne pomiędzy elementami zapewnia śruba, najczęściej przechodząca osiowo wzdłuż przetwornika segmentowego lub rzadziej – układ śrub rozmieszczony po jego obwodzie. Kluczowymi parametrami opisującymi przetwornik są: częstotliwość drgań własnych, współczynnik sprzężenia elektromechanicznego, maksymalna moc robocza oraz sprawność elektroakustyczna. Koncentrator oraz sonotroda stanowią faldowody mechaniczne, których celem jest dostarczenie energii mechanicznej generowanej przez przetwornik elektromechaniczny do obciążenia. Te dwa elementy różnią się funkcją pełnioną w układzie drgającym. Koncentrator stosowany jest jako układ dopasowujący impedancję mechaniczną obciążenia do impedancji przetwornika. Sonotroda jest elementem, który dostarcza energię mechaniczną do obciążenia.

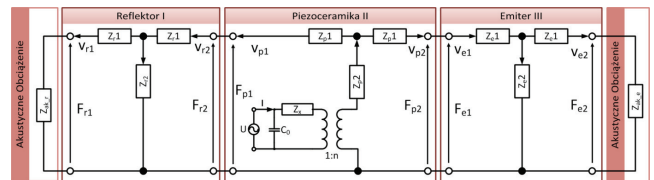
Metody modelowania analitycznego

Metody modelowania analitycznego można podzielić na metody oparte na bezpośrednim wyznaczaniu parametrów przez rozwiązanie równań różniczkowych z założeniami warunkami brzegowymi lub na modelach zastępczych.

Modelowanie układu przetwornika segmentowego można oprzeć na układzie zastępczym pokazanym na rys. 2. W tym przypadku stos piezoceramiczny przedstawiono za pomocą modelu Masona, a masy obciążające za pomocą modelu sy-



Rys. 1. Ultradźwiękowy układ drgający dużej mocy



Rys. 2. Model zastępczy przetwornika segmentowego

metrycznego czwórnik typu T. Zakładając brak obciążenia akustycznego, na podstawie przedstawionego modelu można wyznaczyć następujący wzór na impedancję elektryczną układu [1, 2]:

$$Z_{el} = \frac{1}{j\omega C_0} \left(1 - \frac{k_{33}^2}{k_{ep} h_p} \chi \right)$$

$$\chi = \frac{Z_{ep} \tan(k_{ze} h_e) + Z_{rp} \tan(k_{zr} h_r) + 2 \tan\left(\frac{1}{2} k_{zp} h_p\right)}{1 + \frac{Z_{ze} \tan(k_{ze} h_e) + Z_{rp} \tan(k_{zr} h_r) - Z_{ep} Z_{rp} \tan(k_{ze} h_e) \tan(k_{zr} h_r)}{\tan(k_{zp} h_p)}} \quad (1)$$

$$Z_{ep} = \frac{Z_{ce}}{Z_{cp}} = \frac{S_e \rho_e v_{ze}}{S_p \rho_p v_{zp}}, \quad Z_{rp} = \frac{Z_{cr}}{Z_{cp}} = \frac{S_r \rho_r v_{zr}}{S_p \rho_p v_{zp}}$$

gdzie: ω – częstość kątowna, C_0 – pojemność statyczna, k_{33} – współczynnik sprzężenia elektromechanicznego drgań grubościowych płytki piezoelektrycznej, k_z – liczba falowa, h – długość, Z_c – akustyczna impedancja falowa (charakterystyczna), S – pole przekroju, ρ – gęstość, v_z – prędkość fazowa bloku z indeksami: e – emitery, r – reflektora, p – piezoceramiki.

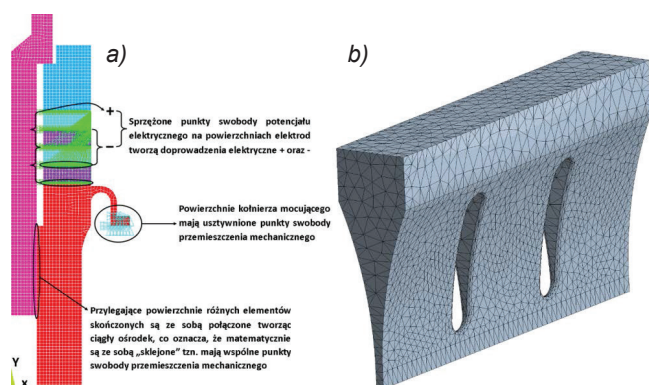
Na podstawie wyrażenia na impedancję elektryczną można wyznaczyć częstotliwości rezonansowe przetwornika i efektywny współczynnik sprzężenia elektromechanicznego k_{eff} .

Metody modelowania numerycznego

Z powodu ograniczeń metod analitycznych projektowanie układu drgającego tylko przy ich pomocy może prowadzić do dużych odstępstw eksperymentalnych, które są tym większe, im bardziej model rzeczywisty nie spełnia założeń modelu analitycznego. Alternatywą dla metod analitycznych są metody numeryczne, takie jak metoda elementów skończonych MES. Pozwala ona przedstawić problem drgań w pełnym wymiarze przestrzennym dla dowolnej geometrii układu. Na rys. 3 przedstawiono model układu przetwornika segmentowego

* Dr inż. Paweł Kogut (pawel.kogut@itr.org.pl); prof. dr hab. inż. Andrzej Milewski (andrzej.milewski@itr.org.pl) – Instytut Tele- i Radiotechniczny

z zaznaczonymi warunkami brzegowymi oraz model sonotrody ostrzowej.



Rys. 3. Przykłady modeli numerycznych typu MES: a) przetwornika segmentowego z wykorzystaniem siatki 2D z elementami osiowosymetrycznymi, b) sonotrody ostrzowej z elementami przestrzennymi

Ogólnie MES sprowadza zagadnienie matematyczne z postaci różniczkowej do algebraicznej poprzez dyskretyzację przestrzenną ośrodka i zmiennych niezależnych układu. Dla układu mechanicznego na rys. 3b równanie ruchu wyraża się w sposób następujący:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C_{uu}]\{\dot{u}\} + [K_{uu}]\{u\} = \{F\} \quad (11)$$

a dla układu z elementami piezoelektrycznymi:

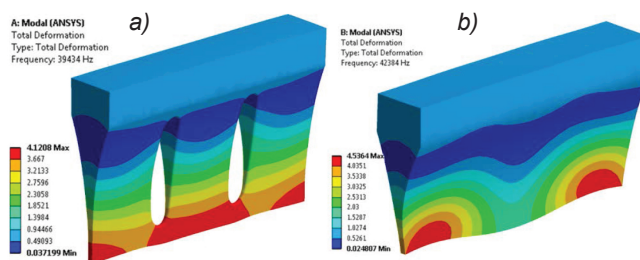
$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{\phi}\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{uu}] & [C_{u\phi}] \\ [C_{\phi u}] & [C_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{\phi}\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\phi}] \\ [K_{\phi u}] & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{u\} \\ \{\phi\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F\} \\ -\{Q\} \end{bmatrix} \quad (12)$$

gdzie: $[M]$ – macierz rozkładu masy; $[C_{uu}]$, $[C_{u\phi}]$, $[C_{\phi\phi}]$ – macierze tłumienia; $[K_{uu}]$, $[K_{u\phi}]$, $[K_{\phi\phi}]$ – macierz podatności, kolejno: mechanicznego, piezoelektrycznego, elektrycznego; $\{u\}$ – wektor przemieszczenia; $\{\phi\}$ – wektor potencjału punktów węzłowych; $\{F\}$ – wektor siły; $\{Q\}$ – wektor rozkładu ładunku w punktach węzłowych.

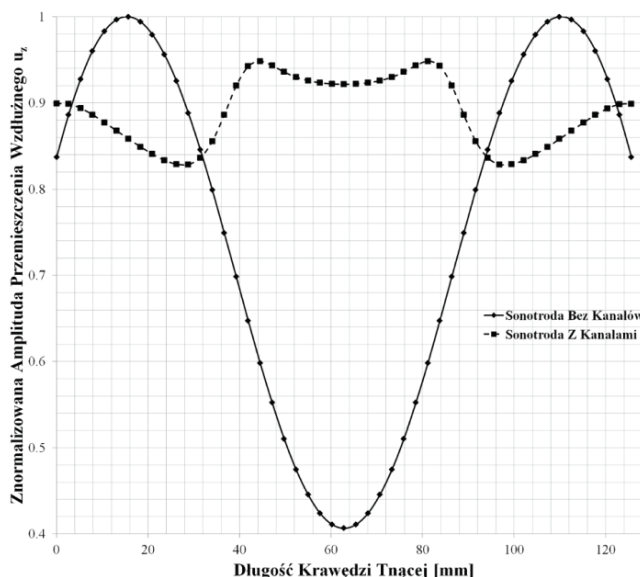
Dokładny opis metody elementów skończonych dla elementów mechanicznych można znaleźć w [6], a dla piezoelektrycznych w [7]. Za pomocą MES możemy oszacować częstotliwości drgań własnych oraz rozkłady pól przemieszczenia i naprężeń, a także dokonać analizy wytrzymałościowej. Za pomocą symulacji dąży się najczęściej do uzyskania: równomiernego rozkładu amplitudy na powierzchniach promieniujących lub sprężenia określonych rodzajów drgań [5], jak najlepszej separacji częstotliwości drgań podstawowych od pasywnych i odpowiedniej wartości wytrzymałości mechanicznej.

Jako przykład analizy układu drgającego za pomocą MES przedstawiono optymalizację geometrii sonotrody ostrzowej z rys. 3b. Dla tego przypadku w literaturze nieznaną jest metoda analityczna, a więc jedyną alternatywą są metody numeryczne. Na rys. 4 przedstawiono wyniki symulacji drgań własnych z rozkładem przemieszczenia dla sonotrod ostrzowych o identycznych wymiarach, z zastosowaniem kanałów i bez.

W sonotrodzie prostopadłościenną o wymiarach poprzecznych porównywalnych z długością fali podłużnej dochodzi do wzbudzenia drgań rozchodzących się w poprzek sonotrody, co znacząco zaburza równomierność rozkładu amplitudy drgań osiowych na krawędzi tnącej. W celu lepszego zobrazowania tego efektu na rys. 5 przedstawiono rozkład amplitudy drgań składowej osiowej wzdłuż krawędzi tnącej. Zastosowanie kanałów, ich odpowiednie rozmieszczenie oraz zoptymalizowanie kształtu znacząco poprawia równomierność rozkładu amplitudy. Jest to bardzo istotne, ponieważ równomierność zapewni zgrzanie lub wycięcie materiału na całej długości



Rys. 4. Wyniki rozkładu przemieszczenia symulacji drgań własnych sonotrody ostrzowej dla układu: a) z kanałami, b) bez kanałów



Rys. 5. Rozkład znormalizowanego przemieszczenia wzdłużnego u_z wzdłuż krawędzi tnącej dla sonotrod z rys. 4

w systemie zgrzewania lub wycinania ultradźwiękowego z zastosowaniem tej sonotrody.

Przykłady projektowania innych modeli sonotrod oraz układu przetwornika mocy przedstawiono w pracach [1÷4].

Podsumowanie

Zastosowanie metod analitycznych i numerycznych pozwala na efektywne zaprojektowanie szerokiej gamy układów drgających. Metody analityczne umożliwiają przedstawienie problemu w sposób jawny, dzięki czemu łatwiej jest wskazać, które parametry układu są istotne, i przeprowadzić proces optymalizacji geometrii układu drgającego. Metody numeryczne umożliwiają natomiast doprecyzowanie projektu wstępnego opartego na obliczeniach analitycznych lub opracowanie modelu w przypadku braku możliwości wykorzystania modeli analitycznych. Rozdzielenie procedury projektowania układów drgających na etap wstępny oparty na metodach analitycznych i końcowy oparty na metodach numerycznych pozwala na szybkie zaprojektowanie układu drgającego.

LITERATURA

1. Kogut P. „Metody modelowania i projektowania ultradźwiękowych układów drgających”, dysertacja doktorska, Wydział Elektryczny, 2015.
2. Kogut P., Milewski A., Kluk P., Kardys W. „Designing the 40kHz Piezoelectric Sandwich Type Ultrasonic Transducer”, *Springer: Advances in Intelligent Systems and Computing*, No. 9, Vol. 414, pp. 173÷187, 2016.
3. Kogut P., Milewski A. Modelowanie i projektowanie ultradźwiękowych układów drgających dużej mocy. *XX Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania, Wytwarzania i Eksploatacji*. Jurata 2016, tom 1, s. 269÷275
4. Kogut P., Milewski A., Kardys W., Kluk P., Gawryś P. „New Multimode Sonotrodes Models Designed for Rotary Ultrasonic Welding Systems”, *Acta Physica Polonica A*, 2013, Vol. 124, No. 3, pp. 474÷478.