

Analiza teoretyczno-symulacyjna transformatora piezoelektrycznego

Theoretical and simulation analysis of piezoelectric transformer

PAWEŁ ŁABĘDZKI
 RAFAŁ PAWLIKOWSKI
 ANDRZEJ RADOWICZ*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.12.574

Przedstawiono analizę teoretyczno-symulacyjną transformatora piezoelektrycznego o dowolnej konfiguracji. Poszukiwano optymalnych parametrów geometrycznych ze względu na uzyskiwane wzmocnienie napięcia. Dokonano analizy pracy transformatora przy różnych postaciach drgań własnych dla dwóch różnych materiałów.

SŁOWA KLUCZOWE: piezoelektryczność, transformator piezoelektryczny, pola sprzężone, fale sprężyste

Theoretical and simulation analysis for the description of a piezoelectric transformer with respect to unrestricted configuration is developed. The working conditions of the transformer dependent on various eigen vibrations for two different kinds of material are considered and the influence of the gauge optimal parameters on a voltage amplification have been studied.

KEYWORDS: piezoelectricity, piezoelectric transformer, coupled fields, elastic waves

Klasyczne transformatory elektromagnetyczne są znane i od lat z powodzeniem stosowane w elektrotechnice i elektronice. Prostota konstrukcji, wysoka niezawodność oraz sprawność konwersji energii elektrycznej na magnetyczną i magnetycznej na elektryczną zapewniły im niekwestionowaną i znaczącą pozycję w technice urządzeń powszechnego użytku. Jednakże w obliczu szybkiego rozwoju elektroniki, a zwłaszcza jej miniaturyzacji, ujawniły się pewne ograniczenia praktycznego zastosowania tych transformatorów, związane z ich rozmiarami, ciężarem oraz generowaniem zakłóceń elektromagnetycznych. W połowie ubiegłego stulecia odkryto materiały ceramiczne o właściwościach piezoelektrycznych, które okazały się przydatne do budowy nowego rodzaju transformatorów – tzw. transformatorów piezoelektrycznych (PT) [1, 2]. W tych transformatorach wejściowe napięcie elektryczne jest przyłożone do części sterującej i powoduje wzbudzenie drgań sprężystych materiału piezoelektrycznego (odwrotne zjawisko piezoelektryczne [3–5]). Drgania te są przenoszone do części roboczej transformatora zawierającej piezoelektryk o odpowiedniej polaryzacji, gdzie na zasadzie prostego zjawiska piezoelektrycznego powodują powstanie wyjściowego napięcia elektrycznego. Ze względów ekonomicznych i możliwości technologicznych transformatory te weszły do użytku dopiero w latach 90. [6, 7]. PT cechują się niewielkimi rozmiarami, małą wagą, wysoką sprawnością oraz niskim poziomem generacji zakłóceń elektromagnetycznych. Natomiast istotnymi wadami PT są: wydzielane ciepło, które jest odprowadzane tylko

przez powierzchnię, oraz wąski zakres temperatury pracy, która rośnie wraz z częstotliwością drgań [8]. Jednakże ze względu na niekwestionowane zalety PT (przede wszystkim rozmiary i wagę) ich znaczenie w dobie powszechnej miniaturyzacji stale rośnie. Obecnie PT znajdują coraz szersze zastosowanie, np. w zasilaczach [6].

W niniejszym artykule omówiono zasadę działania PT. Zastosowano formalizm Lagrange'a do opisu sprzężonych procesów elektromechanicznych, co pozwoliło uzyskać równania dynamiczne, które rozwiązano metodą transformacji Laplace'a. Otrzymano pewne reguły optymalizacyjne dotyczące parametrów wymiarowych konstrukcji PT ze względu na wzmocnienie transformatora.

Model transformatora

Fundamentalne właściwości materiałów piezoelektrycznych, polegające na pojawianiu się w kryształach:

- pola elektrycznego – pod wpływem naprężenia mechanicznego (proste zjawisko piezoelektryczne – równanie (1)),
- deformacji mechanicznych – pod wpływem przyłożonego napięcia (odwrotne zjawisko piezoelektryczne – równanie (2)),

są opisane przez tzw. związki konstytutywne [3–5, 9]:

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ij}^S E_j \quad (1)$$

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} + e_{kij} E_k \quad (2)$$

gdzie zastosowano konwencję sumacyjną oraz: T_{ij} – tensor naprężenia, S_{ij} – tensor odkształcenia, D_i – wektor indukcji elektrycznej, E_i – wektor natężenia pola elektrycznego, c_{ijkl}^E – stałe sprężystości przy ustalonym polu elektrycznym, e_{ikl} – stałe piezoelektryczne, ε_{ij}^S – stałe dielektryczne przy ustalonym odkształceniu.

Stosując oznaczenia Voigta ($T_1 = T_{11}$, $T_2 = T_{22}$, $T_3 = T_{33}$, $T_4 = T_{23}$, $T_5 = T_{31}$, $T_6 = T_{12}$, $S_1 = S_{11}$, $S_2 = S_{22}$, $S_3 = S_{33}$, $S_4 = 2S_{23}$, $S_5 = 2S_{31}$, $S_6 = 2S_{12}$), te związki konstytutywne można zapisać np. w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{32} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{24} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

* Dr inż. Paweł Łabędzki (pawlab@tu.kielce.pl) – Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego Politechniki Świętokrzyskiej; dr inż. Rafał Pawlikowski (rpawlikowski@tu.kielce.pl), prof. dr hab. Andrzej Radowicz (radowicz@tu.kielce.pl) – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

Postacie macierzy stałych materiałowych zależą od struktury krystalicznej [3–5]. W przytoczonych wzorach zapisano postać struktury klasy 6 mm, w której krystalizują m.in. piezoelektryki ceramiczne PZT [5].

W celu wyprowadzenia równań opisujących badany PT skorzystano z formalizmu Lagrange'a. Przyjęto, że lagrangian całego układu elektromechanicznego jest sumą lagrangianów części mechanicznej i elektrycznej [4, 10, 11]. Dla części mechanicznej jako współzrędną uogólnioną przyjęto bezwymiarowy parametr z opisujący czasową zależność wektora przemieszczenia (8), a dla części elektrycznej – strumień pola magnetycznego λ (napięcie wyjściowe $V_{wyj} = \frac{d\lambda}{dt} \equiv \dot{\lambda}$). Sumaryczny lagrangian przyjmuje postać:

$$L = \frac{1}{2} \int_V [\rho \dot{\mathbf{u}}^T \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{E}^T \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E} + 2\mathbf{S}^T \mathbf{e} \mathbf{E} - \mathbf{S}^T \mathbf{c} \mathbf{S}] dV \quad (5)$$

gdzie: pierwszy człon pod całką – gęstość energii kinetycznej, drugi – gęstość energii elektrycznej, trzeci – gęstość energii pól sprzężonych, czwarty – gęstość energii sprężystej; \mathbf{E} , \mathbf{S} , $\boldsymbol{\varepsilon}$, \mathbf{c} , \mathbf{e} – macierze występujące w równaniach (3) i (4); V – objętość elementu piezoelektrycznego; \mathbf{u} – wektor przemieszczenia; ρ – gęstość materiału.

Funkcja L spełnia następujący układ równań:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}} \right) + \frac{\partial F_{dys}}{\partial \dot{z}} - \frac{\partial L}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}} \right) + \frac{\partial F_{dys}}{\partial \dot{\lambda}} - \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad (7)$$

gdzie: F_{dys} – funkcja dysypacji opisująca traconą moc układu PT w postaci strumienia ciepła, wypromieniowanej energii elektromagnetycznej, a zwłaszcza mocy oddawanej do zewnętrznego odbiornika typu $\dot{\lambda}^2/2R$ (R – opór elektryczny odbiornika).

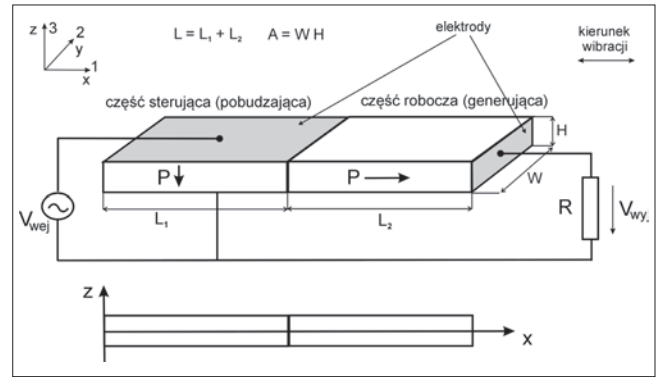
W dalszych rozważaniach przyjęto PT jako obwód otwarty ($R \rightarrow \infty$) i w konsekwencji $F_{dys} = 0$; straty są uwzględniane za pomocą tzw. współczynnika jakości Q_m (24).

W niniejszej pracy rozważany jest PT przedstawiony na rys. 1 wraz z przyjętym układem odniesienia. Lewa strona transformatora – część sterująca – jest prętami o długości L_1 spolaryzowanym prostopadle do kierunku drgań, natomiast prawa strona – część robocza – prętami o długości L_2 spolaryzowanym równoległe do kierunku drgań. Założono (dla przyjętego modelu), że:

- transformator jest prętami – jedynie składowe osiowe odkształcenia i naprężenia są istotne,
- warunki brzegowe – swobodne końce,
- wszystkie pola są jednorodne, np. w części sterującej $E_3 = V_{wej}/H$,
- jedynie składowa natężenia pola elektrycznego zgodna z polaryzacją piezoelektryka jest niezerowa,
- urządzenie pracuje w rezonansie z n -tą postacią drgań własnych pręta $\phi_n(x)$:

$$u(x, t) = Lz(t)\phi_n(x) = Lz(t) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (8)$$

Zasada działania transformatora jest następująca: wejściowe napięcie V_{wej} generuje drgania części sterującej (stała piezoelektryczna e_{31} , odwrotne zjawisko piezoelektryczne), które propagują do części drugiej, roboczej, spolaryzowanej zgodnie z kierunkiem propagacji drgań.



Rys. 1. Schemat modelu PT wraz z definicją parametrów geometrycznych oraz zaznaczonymi kierunkami polaryzacji

Drgania mechaniczne w części roboczej generują pole elektryczne (stała piezoelektryczna e_{33} , proste zjawisko piezoelektryczne), a więc i napięcie wyjściowe V_{wyj} . Opór R reprezentuje odbiornik, do którego podłączony jest transformator.

Funkcję Lagrange'a (5) można zapisać w postaci:

$$L = T + W_{e,s} + W_{e,r} \quad (9)$$

gdzie:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \dot{u}^2 dx \quad (10)$$

$$W_{e,s} = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} A (\varepsilon_{33} E_3^2 + 2S_1 e_{31} E_3 - c_{11} S_1^2) dx \quad (11)$$

$$W_{e,r} = \frac{1}{2} \int_{L_1}^L A (\varepsilon_{33} E_1^2 + 2S_1 e_{33} E_1 - c_{11} S_1^2) dx \quad (12)$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego pręta (rys. 1), $E_3 = V_{wej}/H$, $S_1 = \partial u / \partial x$.

Aby wyrazić E_1 za pomocą współrzędnych uogólnionych z i λ w części roboczej urządzenia, skorzystano z zależności (3) i otrzymano:

$$E_1 = \frac{1}{\varepsilon_{33}} D_1 - \frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}} S_1 \quad (13)$$

Po uwzględnieniu prawa Gaussa $\partial D_1 / \partial x = 0$ (D_1 w części roboczej nie zależy od x) otrzymano:

$$V_{wyj} = \dot{\lambda} = \int_{L_1}^L -E_1 dx = -\frac{L-L_1}{\varepsilon_{33}} D_1 + \frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}} \int_{L_1}^L S_1 dx \quad (14)$$

Wyznaczone z (14) D_1 wstawiono do (13), wyrażając E_1 za pomocą z i λ .

Przyjęto oznaczenie $L_1 = \nu L$, gdzie $\nu \in (0, 1)$ jest wielkością charakteryzującą konstrukcję urządzenia (rys. 1). Wprowadzona zmienna ν umożliwia analizę optymalizacyjną wpływu geometrii transformatora na parametry jego pracy.

Równania Lagrange'a (6) i (7) przyjmują postać:

$$\ddot{z} + \alpha z + \beta \dot{\lambda} + \gamma V_{we} = 0 \quad (15)$$

$$\ddot{\lambda} + \delta \dot{z} = 0 \quad (16)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{e_{33}^2}{\rho L^2 \varepsilon_{33}} \frac{(n\pi)^2 (\sin(2\pi\nu) + 2\pi\nu(1-\nu))}{2\pi\nu + \sin(2\pi\nu)} + \frac{c_{11}}{\rho L^2} \frac{2(n\pi)^3}{(2\pi\nu + \sin(2\pi\nu))} + \frac{e_{33}^2}{\rho L^2 \varepsilon_{33}} \frac{n\pi(8(-1)^n \cos(\pi\nu) - 2 \cos(2\pi\nu) - 6)}{(1-\nu)(2\pi\nu + \sin(2\pi\nu))} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{e_{33}}{\rho L^3} \frac{4\pi n((-1)^{n+1} + \cos(\pi n v))}{(1-v)(2\pi n v + \sin(2\pi n v))} \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{e_{31}}{\rho H L^2} \frac{4\pi n(1 - \cos(\pi n v))}{2\pi n v + \sin(2\pi n v)} \quad (19)$$

$$\delta = \frac{e_{33} L((-1)^{n+1} + \cos(\pi n v))}{\varepsilon_{33}} \quad (20)$$

Równania (15) i (16) są rozpatrywane z zerowymi warunkami początkowymi.

Obliczenia i wyniki

■ **Metoda obliczeń.** W celu rozwiązania równań (15) i (16) poddano je transformacji Laplace'a. Oznaczając transformaty wielkości $z(t)$, $\lambda(t)$ i $V_{weij}(t)$ odpowiednio przez $Z(s)$, $\Lambda(s)$ i $V_{weij}(s)$, otrzymano:

$$Z(s) = -\frac{\gamma V_{weij}(s)}{\omega_0^2 + s^2} \quad \Lambda(s) = \frac{\gamma \delta V_{weij}(s)}{s(\omega_0^2 + s^2)} \quad (21)$$

gdzie częstotliwość rezonansową opisuje wzór:

$$\omega_0^2 = \alpha - \beta \delta \quad (22)$$

Wobec tego transformata wzmocnienia (przekładnia) transformatora wyraża się wzorem:

$$R(s) = \frac{s \Lambda(s)}{V_{weij}(s)} = \frac{\gamma \delta}{\omega_0^2 + s^2} \quad (23)$$

W celu wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej do wzoru (23) podstawiono $s = i\omega$ oraz zbadano $|R(i\omega)|$, tj. amplitudę wzmocnienia PT w zależności od częstotliwości układu ω . Przy braku tłumienia w układzie $|R(i\omega)|$ dąży do nieskończoności dla $\omega = \omega_0$. Należy więc wprowadzić poprawkę do wzorów, która uwzględni zjawisko tłumienia. W tym celu zazwyczaj wprowadza się tzw. współczynnik jakości Q_m – bezwymiarową wielkość charakteryzującą tłumienie w materiale piezoelektrycznym [12]:

$$R(i\omega) = \frac{\gamma \delta}{\omega_0^2 + \frac{\omega_0}{Q_m} \omega i - \omega^2} \quad (24)$$

W ten sposób otrzymuje się następujący wzór na amplitudę wzmocnienia M dla częstości rezonansowej ω_0 :

$$M = |R(i\omega_0)| = \frac{\gamma \delta Q_m}{\omega_0^2} = \frac{4}{\pi n} \frac{(1 - \cos(\pi n v))((-1)^{n+1} + \cos(\pi n v))}{2\pi n(1-v) + \sin(2\pi n v) + \frac{2\pi n}{k_{33}^2}} \frac{e_{31}}{e_{33}} \frac{L}{H} Q_m \quad (25)$$

gdzie: k_{33}^2 – współczynnik sprężenia ($k_{33}^2 = \frac{e_{33}^2}{c_{11} \varepsilon_{33}}$) [10].

Parametr ten ma wpływ na kształt krzywych $M(v)$ dla ustalonego materiału i numeru postaci drgań n .

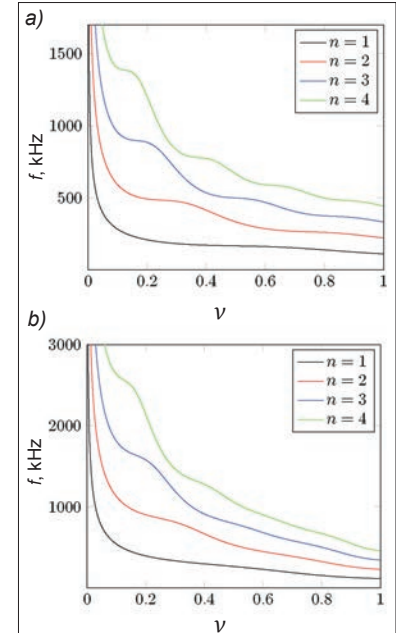
■ **Dane do obliczeń.** W niniejszej pracy analizowano PT dla dwóch różnych materiałów (PZT-4 i PZT-5H) o ustalonych parametrach geometrycznych: $L \times W \times H = 18 \times 3 \times 1,5 \text{ mm}^3$. Transformator o tych wymiarach był wcześniej rozważany w pracy [13], gdzie założono $L_1 = L_2$, ($v = 0,5$) dla materiału PZT (P191). Tu nie ograniczono się jedynie do przypadku symetrycznego, lecz zbadano ogólny przypadek dowolnej proporcji pomiędzy częściami sterującą i roboczą, wprowadzając parametr v .

Parametry materiałowe zastosowane w obliczeniach zestawiono w tabl. I.

TABLICA I. Parametry materiałowe [14]

Materiał	ρ kg/m ³	c_{11} Pa	ε_{33} F/m	e_{33} C/m ²	e_{31} C/m ²	Q_m
PZT-4	7500	$1,19 \cdot 10^{11}$	$7,32 \cdot 10^{-9}$	15,82	-5,29	900
PZT-5H	7500	$1,27 \cdot 10^{11}$	$1,27 \cdot 10^{-9}$	23,24	-6,62	60

■ **Wyniki.** Jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących PT jest częstotliwość ich pracy ω_0 . Na rys. 2 przedstawiono zależność częstotliwości ω_0 (22) od proporcji v .



Rys. 2. Częstotliwość rezonansowa transformatora w zależności od parametru geometrycznego jego konstrukcji ($v = L_1/L$) dla pierwszych czterech postaci drgań własnych: a) PZT-4, b) PZT-5H

Zaobserwowano, że im mniejsza część sterująca w stosunku do części roboczej, tym wyższa częstotliwość pracy transformatora. Ponadto wraz ze wzrostem numeru postaci drgań n rośnie częstotliwość rezonansowa (8).

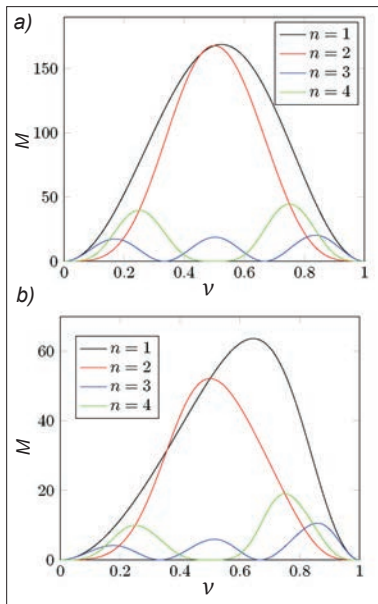
Kolejnym ważnym parametrem charakterystycznym jest wzmocnienie transformatora. W funkcji konstrukcji transformatora, czyli w funkcji stosunku wielkości części sterującej do całości urządzenia ($v = L_1/L$), wyznaczono współczynnik wzmocnienia transformatora M (25) przedstawiony na rys. 3.

Szczegółowe wyniki obliczeń dotyczące wartości maksymalnych wzmocnień M i proporcji v zestawiono w tabl. II.

Z wykresów przedstawionych na rys. 3 oraz danych zawartych w tabl. II można wyciągnąć następujące wnioski:

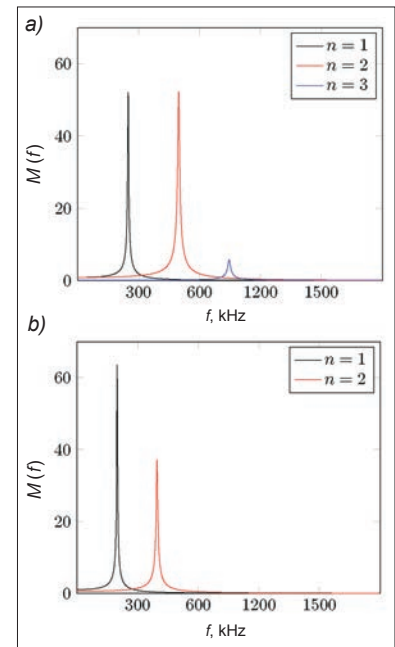
- Największe wzmocnienie uzyskuje się dla pierwszej i drugiej postaci drgań własnych, co wyjaśnia wzór (25): M dla dużych n ($n = 3, 4, \dots$) jest odwrotnie proporcjonalne do n^2 , a więc maleje ze wzrostem numeru postaci drgań.
- Proporcja v , dla której osiągnęte jest największe wzmocnienie, zależy od materiałowego współczynnika sprężenia k_{33} (np. dla $n = 1$ i PZT-4 o mniejszej wartości k_{33} maksimum M jest osiągnięte dla $L_1 \approx L_2$, natomiast dla $n = 1$ i PZT-5H o większej wartości k_{33} dla $L_1 \neq L_2$).
- Istotny wpływ na wzmocnienie M mają: proporcje geometryczne L/H oraz współczynnik jakości Q_m (25).

Potwierdzeniem tych spostrzeżeń jest również wykres wzmocnienia amplitudy napięcia w funkcji częstotliwości. Wyznaczono wzmocnienie dla pierwszych trzech postaci drgań własnych transformatora o konstrukcji symetrycznej ($v = 0,5$) wykonanego z materiałów: PZT-4 (rys. 4) i PZT-5H (rys. 5a).



Rys. 3. Wzmocnienie transformatora w zależności od parametrów geometrycznych jego konstrukcji ($\nu = L_1/L$) dla pierwszych czterech postaci drgań własnych: a) PZT-4, b) PZT-5H

Rys. 5. Amplituda wzmocnienia $|R(i\omega)|$ transformatora z materiału PZT-5H w zależności od częstotliwości dla dwóch konstrukcji transformatora: a) $\nu = 0,5$, b) $\nu = 0,64$

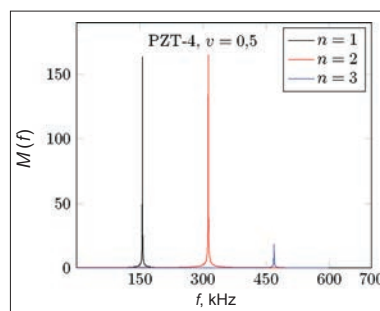


TABLICA II. Wartości maksymalnych wzmocnień dla poszczególnych postaci drgań własnych

Materiał	Numer drgań własnych	Proporcja	Wzmocnienie
PZT-4 $k_{33} = 0,51$	$n = 1$	$\nu = 0,52$	$M = 168,61$
	$n = 2$	$\nu = 0,50$	$M = 167,70$
	$n = 3$	$\nu_1 = 0,17$	$M_1 = 17,32$
		$\nu_2 = 0,50$	$M_2 = 18,65$
		$\nu_3 = 0,84$	$M_3 = 20,19$
	$n = 4$	$\nu_1 = 0,25$	$M_1 = 19,66$
$\nu_2 = 0,75$		$M_2 = 44,48$	
PZT-5H $k_{33} = 1,83$	$n = 1$	$\nu = 0,64$	$M = 63,63$
	$n = 2$	$\nu = 0,50$	$M = 52,12$
	$n = 3$	$\nu_1 = 0,18$	$M_1 = 4,12$
		$\nu_2 = 0,52$	$M_2 = 5,90$
		$\nu_3 = 0,86$	$M_3 = 10,518$
	$n = 4$	$\nu_1 = 0,25$	$M_1 = 9,92$
$\nu_2 = 0,75$		$M_2 = 19,98$	

Na podstawie rys. 3 oraz danych z tabl. II dla materiału PZT-5H wykazano, że manipulując konstrukcją transformatora (współczynnikiem ν), można uzyskać większe wzmocnienie dla konstrukcji niesymetrycznej ($\nu = 0,64$) przy pierwszej postaci drgań własnych ($n = 1$).

Rys. 4. Amplituda wzmocnienia $|R(i\omega)|$ w zależności od częstotliwości dla konkretnej konfiguracji transformatora ($\nu = L_1/L = 0,5$) i dla pierwszych trzech postaci drgań własnych



Wnioski

Za pomocą formalizmu Lagrange'a wyprowadzono równania opisujące klasyczny PT. Otrzymano wzory na częstotliwości rezonansowe pracy transformatora. Na przykładzie dwóch wybranych materiałów (PZT-4 i PZT-5H) pokazano, jak częstotliwości rezonansowe zmieniają się dla poszczególnych postaci drgań własnych w zależności od wymiarów części sterującej i roboczej. Wyznaczono współczynnik wzmocnienia i określono, w jaki sposób zależy on od parametrów konstrukcyjnych. Zauważono, że największe wzmocnienie uzyskuje się dla zbliżonych rozmiarów części

sterującej i roboczej, jednak w przypadku niektórych materiałów piezoelektrycznych (np. PZT-5H) korzystniejsza pod tym względem jest konstrukcja niesymetryczna (rys. 5).

Ponadto stwierdzono, że istnieje możliwość manipulowania w niewielkim zakresie częstotliwością napięcia wyjściowego poprzez zmianę geometrii konstrukcji transformatora, lecz jest to okupione ogromnymi stratami na wzmocnieniu.

Typowy PT wykorzystuje dwie pierwsze postaci drgań własnych – to one mają praktyczne znaczenie z punktu widzenia uzyskiwanego wzmocnienia. Dla każdej z nich osiąga się podobne wzmocnienie, lecz druga postać drgań własnych generuje napięcie o dwukrotnie wyższej częstotliwości niż pierwsza. Dla pozostałych postaci drgań własnych wzmocnienie jest mniejsze (rys. 3–5), więc raczej nie mają one znaczenia praktycznego.

LITERATURA

- Rosen C.A., Fish K.A., Rothenberg H.C. U.S. Patent No. 2,830,374, April 1954.
- Rosen C.A. "Ceramic transformers and filters". *Proc. Electronic Component Symposium*. 1956, pp. 205–211.
- Auld B.A. "Acoustic fields and waves in solids". Florida: R.E. Krieger Publishing Company, 1990.
- Nowacki W. „Efekty elektromagnetyczne w stałych ciałach odkształcalnych”. Warszawa: PWN, 1983.
- Royer D., Dieulesaint E. "Elastic waves in solids". Berlin – Heidelberg: Springer Verlag, 2000.
- Carazo A.V. "50 years of piezoelectric transformers. Trends in the technology". *MRS Proceedings*. Vol. 785 (2003).
- Lin Ray-Lee. "Piezoelectric transformer characterization and application of electronic ballast". Diss. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- Schwarzmann H. „Piezoelektrische Transformatoren zur Ansteuerung von Leistungsschaltern”. Diss. Universitätsbibliothek der Universität Erlangen-Nürnberg, 2011.
- Radowicz A. „Fale powierzchniowe”. Monografie. Kielce: Politechnika Świętokrzyska, 1994.
- Preumont A. "Mechatronics: dynamics of electromechanical and piezoelectric systems". Vol. 136. Springer Science & Business Media, 2006.
- Awrejcewicz J., Koruba Z. "Classical Mechanics. Applied Mechanics and Mechatronics". Springer Science + Business Media, LLC 2012.
- Mezheritsky A.V. "Elastic, dielectric, and piezoelectric losses in piezoceramics: how it works all together". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 51, 6 (2004): pp. 695–707.
- Boukzouha F. et al. "A comparison of 1D analytical model and 3D Finite Element Analysis with experiments for a Rosen-type piezoelectric transformer". *Ultrasonics*. 60 (2015): pp. 41–50.
- www.efunda.com/materials/piezo/material_data/