#### MOTROL, 2006, 8A, 49-58

# IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW MODELU PRZETWORNIKA PIEZOELEKTRYCZNEGO JAKO CZUJNIKA SIŁY UDERZENIOWEJ

### Artur Boguta

#### Politechnika Lubelska

**Streszczenie**. Praca przedstawia sposób wyznaczania wartości elementów składowych modelu przetwornika piezoelektrycznego. Zawiera opis symulacji charakterystyk czasowych i częstotliwościowych zastosowanego modelu przetwornika piezoelektrycznego oraz porównanie go z charakterystykami przetwornika rzeczywistego. Ponadto zawiera ona ocenę przydatności zastosowanego modelu do korekcji błędów przetwarzania.

Słowa kluczowe: przetwornik piezoelektryczny, uderzenie, uszkodzenie nasion

#### WSTĘP

Pomiary przeprowadzane na obiektach rzeczywistych oraz korekcja błędów pomiarowych jest bardzo pracochłonna. Symulacje przedstawione w pracy pozwalają na korektę błędów na etapie projektowania układu pomiarowego.

Pomiary i symulacje wykonano na przykładzie przetwornika piezoelektrycznego, zastosowanego do pomiarów obciążeń dynamicznych powstających podczas uderzenia.

### POMIARY PARAMETRÓW SCHEMATU ZASTĘPCZEGO PRZETWORNIKA PIEZOELEKTRYCZNEGO

Na rys. 1 przedstawiono model przetwornika z odpowiednim wejściem pozwalającym na przeprowadzenie symulacji zachowania się przetwornika.

Pomiary wartości elementów statycznych schematu zastępczego wykonano mostkiem RLC E318 w układzie przedstawionym na rys. 2.



Rys.1. Schemat modelu przetwornika pomiarowego Fig.1. The electric model of measuring transducer



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego: 1– badany przetwornik, 2 – mostek pomiarowy RLC E318

Fig. 2. The block diagram of the measurement system: 1 – transducer, 2 – measuring bridge RLC  $$\rm E318$$ 

Zmierzono następujące wartości elementów:

$$C_{\rm e} = 19,5 \, {\rm nF}$$
  $R_{\rm e} = 0,51 \, {\rm G}\Omega$ 

W pomiarach i obliczeniach wartości elementów dynamicznych modelu przetwornika piezoelektrycznego  $R_{\rm m}$ ,  $L_{\rm m}$ ,  $C_{\rm m}$  posłużono się schematem zastępczym przetwornika z pominięcie dużej rezystancji  $R_{\rm e}$ . Z przedstawionego rysunku wynika, że w tym układzie wystąpią dwa rezonanse. Pierwszy wystąpi w gałęzi szeregowej  $R_{\rm m}$ ,  $C_{\rm m}$ , i  $L_{\rm m}$ , oraz rezonans równoległy gałęzi  $R_{\rm m}$ ,  $C_{\rm m}$ ,  $L_{\rm m}$ , z pojemnością  $C_{\rm e}$ . Na podstawie pomiarów laboratoryjnych otrzymano następujące częstotliwości rezonansów podstawowych, szeregowego  $f_{\rm g}$  i równoległego  $f_{\rm r}$ :

$$f_{\rm s} = 1/T_{\rm s} = 64,1 \text{ kHz}$$
  $f_{\rm r} = 1/T_{\rm r} = 65,5 \text{ kHz}$ 

Dla gałęzi szeregowej możemy zapisać równanie pozwalające na obliczenie częstotliwości rezonansowej:

$$f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_m \cdot C_m}} \tag{1}$$

oraz dla rezonansu równoległego:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_m \cdot \frac{C_m \cdot C_e}{C_m + C_e}}}$$
(2)

Po podstawieniu:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad f_r = \frac{1}{T_r} \tag{3}$$

i odpowiednim przekształceniu równań otrzymamy wzory pozwalające na obliczenie wartości elementów  $C_{\rm m}$ ,  $L_{\rm m}$ :

$$C_{m} = \frac{C_{e} \left(T_{s}^{2} - T_{r}^{2}\right)}{T_{r}^{2}}$$
(4)

$$L_m = \frac{T_s^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot C_m} \tag{5}$$

Po podstawieniu wartości okresów rezonansów szeregowego i równoległego oraz wartości pojemności  $C_e$  i pominięciu rezystancji  $R_e$  otrzymano:

$$C_{\rm m} = 1,02 \text{ nF}$$
  $L_{\rm m} = 6 \text{ mH}.$ 

Kolejnym etapem było wyznaczenie wartości rezystancji dynamicznej  $R_{\rm m}$ , która odpowiada za straty w obwodzie.

Jeżeli przetwornik znajduje się w rezonansie szeregowym, to spełniona jest zależność:

$$XL_m - XC_m = 0. ag{6}$$

W tym przypadku schemat zastępczy (rys. 1) przetwornika upraszcza się do postaci przedstawionej na rys. 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy przetwornika piezoelektrycznego dla rezonansu szeregowego Fig. 3. The diagram of the piezoelectric transducer in a series resonance time

Aby wyznaczyć wartość rezystancji dynamicznej  $R_m$ , trzeba dołączyć szeregowo do przetwornika znaną rezystancję zewnętrzną, pozwalającą na pomiar prądów płynących przez elementy składowe przetwornika w czasie rezonansu szeregowego (rys. 4).



Rys. 4. Schemat zastępczy modelu przetwornika pomiarowego z dodatkową rezystancją Fig. 4. The diagram of the piezoelectric transducer model with an additional resistance

Do układu przedstawionego na rys. 4 dołączono generator, ustawiając znaną wartość amplitudy sygnału zasilającego o przebiegu sinusoidalnym. Następnie pomierzono metodą oscyloskopową spadki napięć na przetworniku oraz na rezystancji dodatkowej  $R_d = 1 \text{ k}\Omega$  w czasie rezonansu.

Przy napięciu wyjściowym z  $U_{wy} = 13$  V zmierzono następujące wartości napięć na przetworniku oraz na rezystancji dodatkowej:

$$U_{\rm Rm} = U_{\rm Ce} = 0,22 \, \rm V$$
  $U_{\rm Rd} = 12,89 \, \rm V$ 

Dla schematu przedstawionego na rys. 7 na podstawie prawa Kirchoffa można napisać równanie:

$$I_{R_d}^2 = I_{R_m}^2 + I_{C_e}^2 \tag{7}$$

Na podstawie znanych spadków napięć na poszczególnych elementach oraz wartości elementów można obliczyć poszczególne wartości prądów:

$$I_{R_d} = \frac{U_{R_d}}{R_d} = 12,89 \text{ mA}$$
(8)

$$I_{C_e} = U_{C_e} \cdot \omega C_e = 1,74 \text{ mA}$$
(9)

$$I_{R_m} = \sqrt{I_{R_d}^2 - I_{C_e}^2} = 12,77 \text{ mA}$$
(10)

Rezystancja dynamiczna badanego przetwornika wynosi:

$$R_m = \frac{U_{R_m}}{I_{R_m}} = 17,38\,\Omega$$
 (11)

Tak otrzymany schemat zastępczy przetwornika piezoelektrycznego poddano wstępnej symulacji w programie PSpice w celu jego dostrojenia.

## WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH I CZASOWYCH MODELU PRZETWORNIKA POMIAROWEGO

Symulacje zachowania się modelu przetwornika piezoelektrycznego przeprowadzono za pomocą programu PSpice.





Charakterystyki częstotliwościowe modelu przetwornika piezoelektrycznego wyznaczono przy wykorzystaniu schematu z rys. 5. Połączenie modelu przetwornika z generatorem wykonano przez odpowiednią impedancję ( $R_z C_z$ ), która zastępuje współczynnik sprzężenia elektromechanicznego w układzie rzeczywistym.

Otrzymaną charakterystykę częstotliwościową modelu przetwornika piezoelektrycznego przedstawiono na rys. 6. Uwzględnia ona tylko pierwszą częstotliwość rezonansową przetwornika. Widać tu wyraźnie rezonans szeregowy i równoległy. Leżą one bardzo blisko siebie (64 kHz, 67 kHz), tak jak ma to miejsce w przypadku charakterystyki częstotliwościowej przetwornika rzeczywistego (64 kHz, 65,5 kHz), przedstawionej na rys. 7. W układzie rzeczywistym występują wyższe częstotliwości rezonansowe (rys. 7.), które nie zostały uwzględnione w modelu.

Odpowiedź modelu przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy wykonano w układzie przedstawionym na rys. 8. Do wejścia modelu przetwornika dołączono źródło napięcia o przebiegu prostokątnym za pośrednictwem impedancji złożonej z  $R_z$  i  $C_z$ .



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa przetwornika piezoelektrycznego Fig. 7. Frequency characteristics of the piezoelectric transducer

Na otrzymanym przebiegu czasowym odpowiedzi przetwornika na impuls skokowy występuje gasnąca oscylacja o dużej częstotliwości. W odpowiedzi modelu na skok jednostkowy nie pojawia się dudnienie gasnących oscylacji, spowodowane to jest uproszczeniem modelu.

Czas narastania sygnału w modelu przetwornika wyznaczono metodą graficzną. Jest on krótszy od czasu narastania dla przetwornika pomiarowego i wynosi  $T01/09 = 1,6 \mu s$ , dla przetwornika rzeczywistego  $T01/09 = 3,9 \mu s$ . Czas opadania sygnału w modelu jest zbliżony do czasu w przetworniku rzeczywistym.



Rys. 8. Odpowiedź modelu przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy Fig. 8. The transducer model answer to an elementary specific impulse



Rys.9. Odpowiedź przetwornika piezoelektrycznego na skok jednostkowy Fig.9. The piezoelectric transducer answer to an elementary specific impulse

### WYZNACZANIE ODPOWIEDZI MODELU PRZETWORNIKA NA IMPULS SINUSOIDALNY

Przy sprawdzeniu odpowiedzi przetwornika na impuls sinusoidalny, odpowiadający przebiegiem impulsowi siły w uderzeniu sprężystym, stwierdzono odstępstwo od przebiegów teoretycznych. Polegało ono na tym, że obliczony współczynnik restytucji był większy od jedności.

$$k = \frac{S''}{S}$$
(12)

gdzie:

S' – impuls siły chwilowej pierwszej fazy uderzenia,

S'' – impuls siły chwilowej drugiej fazy uderzenia.

Świadczy to o błędzie przetwarzania modelu przetwornika oraz sugeruje, że taki błąd może wystąpić podczas pomiarów w układzie rzeczywistym. Przykładową symulację odpowiedzi przetwornika wykonano w układzie przedstawionym na rys. 5, a odpowiedzi układu na rys. 10.

Podczas symulacji zauważono, że zewnętrzna rezystancja podłączona równolegle do zacisków wyjściowych modelu przetwornika powoduje zmniejszenie wartości współczynnika restytucji.





W celu sprawdzenia wpływu rezystancji zewnętrznej zmienianej w przedziale od 0,5 k $\Omega$  do 1 M $\Omega$  na wartość współczynnika restytucji wykonano serię symulacji. Na rys. 11, przedstawiono wpływ rezystancji obciążającej przetwornik piezoelektryczny na wartość współczynnika restytucji.



Rys.11. Wpływ rezystancji obciążającej na wartość współczynnika restytucji dla modelu przetwornika Fig.11. The influence of termination resistance on piezoelectric transduction restitution factor

Na podstawie rys. 11 można stwierdzić, że możliwe jest dobranie takiej rezystancji zewnętrznej obciążającej przetwornik, aby zminimalizować błąd pomiaru wartości współczynnika restytucji (dla uderzenia sprężystego k = 1). Z przedstawionego rysunku wynika, że jej wartość powinna wynosić około 4 k $\Omega$ .

Pomiary w układzie rzeczywistym przedstawionym na rys. 12 wykazały, że dla uderzenia sprężystego przy różnych wartościach rezystancji równoległej można zminimalizować błąd pomiaru współczynnika restytucji. W układzie pomiarowym rezystancję zmieniano w przedziale od 300  $\Omega$  do 1 M $\Omega$ , a optymalna jej wartość wynosi 2 k $\Omega$ , co przedstawiono na rys. 13.



Rys. 12. Schemat blokowy układu pomiarowego siły i czasu uderzenia: 1 – uderzający obiekt,
2 – przetwornik piezoelektryczny, 3 – wzmacniacz pomiarowy i układ wyzwalający,
4 – oscyloskop cyfrowy, 5 – koncentrator sieciowy (HUB), 6 – komputer.

Fig. 12. The block diagram of the force percussion and the time measuring system: 1 – impact object, 2 – piezoelectric transductor,3 – measuring amplifier and starting system, 4 – digital oscilloscope, 5 – network concentrator, 6 – computer PC.



Rys. 13. Wpływ rezystancji równoległej na błąd odczytu współczynnika restytucji *R* Fig. 13. The influence of parallel resistance on restitution factor reading error

### WNIOSKI

1. Model elektryczny przetwornika piezoelektrycznego pozwala na przeprowadzenie symulacji odpowiedzi częstotliwościowych, odpowiedzi czasowych i zachowania się przetwornika piezoelektrycznego podczas uderzenia.

2. Badania symulacyjne pozwalają na korektę błędów na etapie projektowania układu pomiarowego.

3. Symulacje umożliwiły stwierdzenie wpływu rezystancji równoległej do zacisków wyjściowych przetwornika na błąd pomiaru współczynnika restytucji.

#### PIŚMIENNICTWO

Jagodziński Z. 1997: Przetworniki ultradźwiękowe. WKiŁ, Warszawa.

Król A., Moczko J. 1998: PSpice. Symulacja i optymalizacja układów elektronicznych. Nakom, Poznań.

Lejko J. 1997: Mechanika ogólna. Dynamika. WNT, Warszawa.

Wojtuszkiewicz K., Zacharowa Z. 2000: PSpice przykłady praktyczne. Mikom, Warszawa.

#### PARAMETERS IDENTIFICATION OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER'S MODEL AS A PERCUSSION FORCE DETECTOR

**Summary.**The article presents the way in which the value of elements of piezoelectric convector model is determined. It describes simulations of the time and frequency characteristics of the applied piezoelectric transducer model and its comparison to a real converter. In addition the paper contains an evaluation this model's ability to adjust the transformation errors.

Key words: the piezoelectric transducer, the knock, the damage of seeds

Recenzent: prof. dr hab. Andrzej Kusz